



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

MECANISMOS DE RESISTENCIA Y DEFORMACIÓN
DE MUROS DE MAMPOSTERÍA COMBINADA Y
CONFINADA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

P R E S E N T A

ARTEMIO JUÁREZ ÁNGELES

DIRECTOR DE TESIS: **DR. ARTURO TENA COLUNGA**

MÉXICO, D. F.

ENERO DE 2009

A mis padres y hermanos

AGRADECIMIENTOS

La presente tesis es un estudio realizado gracias al apoyo recibido por parte de CONACYT que me otorgó la beca para desarrollar los estudios de maestría, así como de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en la que se realizó todo el programa experimental.

Agradezco en primer lugar al Dr. Arturo Tena Colunga por todo el apoyo brindado y a la confianza que deposito en mí, además de la paciencia que me tuvo.

También quiero agradecer al Dr. Alonso Gómez Bernal y al M en I. Leonardo Flores por sus revisiones y comentarios al manuscrito.

Me siento profundamente agradecido con el Ing. Víctor Hugo Salinas Vallejo por el apoyo y ayuda que me brindó durante todo el programa experimental.

La etapa experimental no pudiera haber sido posible sin la colaboración de innumerables colegas y alumnos de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Se agradece por la tanto al Técnico Académico Leopoldo Quiroz, el Técnico Rubén Barrera el Sr. José Luis Caballero y la Sra. Silvia Ledezma por su invaluable apoyo en el desarrollo del trabajo experimental, al M. en I. Hans I. Archundia por su apoyo en los ensayos experimentales y en la adquisición de datos, al Ing. Alejandro Grande Vega por su ayuda en la preparación de las etapas experimentales y a los entusiastas alumnos de la carrera de ingeniería civil que han participado de diversas maneras en el desarrollo de sus talleres de ingeniería civil: César Carpio, José Manuel Alonso, Misael Bahena, Daniel Miranda, Sergio López, Eder Gudiño, Rosaura Ramírez, Efraín Joaquín Diego, Marco Antonio Rico, René Espinoza, Richard Veliz, Roberto Moreno, Elías Josué Moral y Gerardo Ibarra.

Finalmente, se agradecen las valiosas opiniones y experiencias que compartió el M. en I. Leonardo Flores del CENAPRED, así como el material proporcionado para la preparación y culminación de la misma.

ÍNDICE

Índice	
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
CAPÍTULO 2	3
2. Antecedentes	3
2.1. Comportamiento general de la mampostería	4
2.2. Modalidades de mampostería más comúnmente utilizadas en México	6
2.2.1. No reforzada	6
2.2.2. Confinada	8
2.2.3. Con refuerzo interior	11
2.3. Mampostería combinada y confinada	13
2.3.1 Origen	14
2.3.2 Descripción de los materiales que la componen	15
2.3.3 Ubicación geográfica de los lugares de su uso	17
2.3.4 Variantes	18
CAPÍTULO 3	23
3. Determinación de propiedades índice de la mampostería combinada	23
3.1. Propiedades de las piezas	23
3.1.1 Dimensiones de las piezas	23
3.1.2 Resistencia a la compresión de las piezas	24
3.1.3 Contenido de humedad	25
3.1.4 Coeficiente de saturación	27
3.1.5 Módulo de ruptura	28
3.1.6 Peso volumétrico	27
3.2. Propiedades del mortero de pega	29

3.2.1	Dosificación del mortero usado	29
3.2.2	Resistencia a la compresión del mortero	29
3.2.3	Peso volumétrico	30
3.3.	Propiedades índice del ensaye de pilas	31
3.3.1	Fundamentos de la prueba a compresión	31
3.3.2	Máquina de prueba	32
3.3.3	Dispositivo para medir el acortamiento en las pilas	33
3.3.4	Resistencia a la compresión	33
3.3.5	Módulo de elasticidad	35
3.3.6	Modos de falla	36
3.4.	Propiedades índice del ensaye de muretes	37
3.4.1.	Fundamentos de la prueba a compresión	37
3.4.2.	Máquina de prueba	38
3.4.3.	Dispositivo para medir el acortamiento y el alargamiento de las diagonales	38
3.4.4.	Resistencia a la compresión diagonal	39
3.4.5.	Módulo de rigidez a cortante	41
3.4.6.	Modos de falla	42
3.5.	Energía de fractura	43
3.4.1.	Módulo de resiliencia	44
3.4.2.	Módulo de tenacidad	45
CAPÍTULO 4		47
4.	Diseño y construcción de los muros de prueba	47
4.1.	Descripción de los especímenes	47
4.2.	Procedimiento constructivo	51
4.3.	Criterios de diseño	53
4.4.	Predicción de resultados	53
4.4.1.	Fuerza cortante	53
4.4.2.	Resistencia a flexocompresión en el plano del muro	54
CAPÍTULO 5		56
5.	Instrumentación de los muros de prueba	56

5.1.	Instrumentación externa	56
5.2.	Instrumentación interna	58
CAPÍTULO 6		61
6.	Ensaye experimental de los muros de prueba ante carga lateral	61
6.1.	Dispositivo de carga	61
6.2.	Protocolo de ensaye	63
6.3.	Historia de los desplazamientos	64
6.4.	Resultados experimentales	65
6.4.1	Comportamiento histerético	65
6.4.2	Envolvente de la curva carga lateral-distorsión	66
6.4.3	Degradación de rigidez de ciclo	67
6.4.4	Disipación de energía	68
6.4.4.1.	Energía de deformación	69
6.4.4.2.	Energía disipada equivalente	70
6.4.4.3.	Energía histerética acumulada	72
6.4.5	Amortiguamiento viscoso equivalente	72
6.4.6	Índice de daño de Kwok y Ang	74
6.4.7	Agrietamiento	76
6.5.	Criterios de aceptación de acuerdo a las NTCM-2004	77
6.6.	Propuesta de distorsión de diseño para la mampostería combinada y confinada	80
6.7.	Propuesta de ajuste al índice de Kwok y Ang para esta modalidad de mampostería	85
6.8.	Comparación con los resultados de pruebas de muros similares, ensayados en el CENAPRED (tabiques de barro recocido)	87
6.9.	Normalización de resultados	90
6.10.	Comportamiento del refuerzo longitudinal en los castillos	91
CAPÍTULO 7		94
7.	Comparación de las curvas carga-deformación con modelos analíticos propuestos para mampostería confinada.	94

CAPÍTULO 8	101
8. Conclusiones	101
APÉNDICES	105
A. Calculo de las propiedades índice de los materiales de construcción	105
B.1. Resistencia a compresión del concreto	105
B.2. Propiedades del mortero de pega	109
B.3. Propiedades de las piezas de mampostería	113
B.4. Resistencia a compresión y módulo de elasticidad	120
B.5. Resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante	122
B. Gráficas de los ensayos a los materiales de construcción	125
B.1. Pilas de mampostería combinada	125
B.2. Muretes de mampostería combinada	127
C. Cálculos de la energía de deformación y curvas experimentales ajustadas	131
C.1. Energía de deformación de pilas, Arreglo 1	131
C.2. Energía de deformación de pilas, Arreglo 2	136
C.3. Energía de deformación de muretes, Arreglo 1	141
C.4. Energía de deformación de muretes, Arreglo 2	147
REFERENCIAS	152

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia la mampostería ha jugado, en general, un papel fundamental para el hombre, dándole refugio y protección. Sin embargo, en algunas ocasiones las estructuras con base en mampostería se vuelven un peligro para quien las habita, debido a que en algunas situaciones los muros de mampostería no son capaces de resistir las sollicitaciones a las que son expuestos, principalmente ante cargas accidentales intensas como las producidas por los sismos.

En las escuelas de ingeniería civil de las universidades hablamos de estructuras de concreto, de acero, de madera y de estructuras de mampostería, y les damos más importancia a las dos primeras. Sin embargo, esta última es la más frecuente en el campo laboral del ingeniero civil. Sin embargo, se tiene que tanto en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería vigentes (NTCM-2004), como en la mayoría de la bibliografía existente para este tipo de estructuras, las actualizaciones de las resistencias de los muros de mampostería son escasas y se puede ver también el poco interés que se ha mostrado a lo largo de los años para implantar nuevos métodos y materiales de refuerzo y construcción.

Entre las modalidades de mampostería más usadas en México podemos distinguir la mampostería no reforzada, mampostería confinada y la mampostería con refuerzo interior, siendo la mampostería confinada la más popular en zonas urbanas y conurbanas de las ciudades de la Republica Mexicana.

La demanda de vivienda en México y, sobre todo, en las zonas conurbanas de algunas ciudades, obliga a recurrir a nuevos sistemas constructivos que permitan un ahorro, tanto en costos de materiales como en tiempos de ejecución.

Una modalidad que la gente comenzó a utilizar de manera espontánea es aquella en que los muros se construyen alternando hiladas de bloques sólidos de concreto ligero con tabiques de barro recocido, a la cual hemos nombrado mampostería combinada. Este tipo de mampostería, que cae dentro de la confinada, permite un ahorro en costos y tiempos de ejecución, y la apariencia que ésta tiene es estética.

Actualmente, éste tipo de mampostería se está utilizando principalmente en Puebla, Tlaxcala, Oaxaca, Estado de México, Querétaro y, comienza en el Distrito Federal, que son regiones de alto peligro sísmico.

La investigación experimental previa que se ha hecho en mampostería en México no incluye a la mampostería combinada descrita anteriormente, por lo que surge necesidad del estudio de esta modalidad constructiva, para valorar sus mecanismos de resistencia y deformación ante la eventual acción de sismos, ya que se está utilizando en zonas sísmicas de México.

En el presente estudio se determinan los mecanismos de resistencia y deformación de este tipo de mampostería combinada y confinada sujeta a carga lateral cíclica, además se muestran las propiedades índice y el desarrollo experimental de dichos ensayos.

Se ensayaron dos especímenes de mampostería combinada y confinada a escala natural, en el laboratorio de estructuras del la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), con las características observadas en los estados que está siendo utilizada. Las variantes entre ambos modelos fueron, la carga vertical aplicada y el orden de las hiladas de los diferentes tipos de pieza usados. Las propiedades generales de los muros se definieron de acuerdo ensayos realizados en el Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED.

Los objetivos de este estudio son los siguientes:

- Determinar las propiedades índice de la mampostería combinada y confinada.
- Determinar los mecanismos de resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada ante carga lateral
- Viabilidad del uso de piezas de mampostería diferente en un solo muro.
- Recomendaciones del uso de este tipo de mampostería en las zonas que actualmente se esta usando y en zonas aledañas
- Comparación de las curvas carga-deformación con las que se obtengan con modelos analíticos para mampostería confinada

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

Las construcciones de mampostería se encuentran entre las más antiguas de la humanidad. A lo largo de la historia se han construido desde las construcciones más simples (figura 2.1), hasta muchas de las magnas obras utilizando principalmente piedras naturales. Estas obras perduran hasta nuestros días como patrimonio cultural a nivel mundial y están consideradas en algunos casos como unas de las siete maravillas (figura 2.2).



Figura 2.1. Estructura de mampostería de adobe y piedra natural

La mampostería, como alternativa constructiva, ha sido a lo largo de la historia de la humanidad una de las soluciones más usadas. Sin embargo, este sistema constructivo ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, comenzando con el uso de piezas naturales, hasta hoy en día, que se usa en la mayoría de los casos piezas artificiales. El material de pega también ha evolucionado, usándose en la actualidad una mezcla con base en cemento, cal y arena en proporciones de acuerdo a la práctica dominante de cada región.

Como se aprecia en la figura 2.2, las estructuras de mampostería antiguas son muy robustas, diseñadas principalmente para tomar cargas gravitacionales, lo que en algunos casos las puede hacer vulnerables ante solicitaciones sísmicas, ya que en su gran mayoría carecen de refuerzo. Actualmente, la mampostería que se construye es más esbelta, principalmente la destinada a la vivienda. Esto ha generado un extenso interés en el estudio de los diferentes tipos de mampostería para entender su comportamiento también ante las cargas accidentales, como las debidas a sismos.



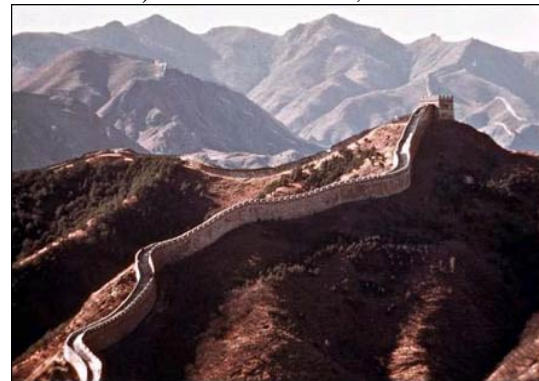
a) Pirámides de Giza, Egipto



b) Coliseo Romano, Italia



c) El castillo, Chichén Itzá, México



d) Muralla China

Figura 2.2 Estructuras antiguas de mampostería, (tomadas de la página http://www.terra.com.mx/Turismo/galeria_de_fotos/009507/galeria.asp)

2.1 Comportamiento general de la mampostería

La mampostería se ha empleado desde tiempos muy remotos en la construcción de estructuras. Tradicionalmente se trata de un material de fabricación artesanal, ya que antiguamente se colocaban muros de mampostería simple (sin refuerzo) sólo para soportar las cargas verticales y no para resistir simultáneamente las cargas sísmicas. Una consecuencia de esta práctica ha sido la pérdida de muchas vidas por el colapso o el daño severo de construcciones de mampostería simple durante sismos intensos. Por la razón anterior la mampostería no reforzada se ganó la reputación de un sistema inadecuado para la construcción de edificios en zonas de alto peligro sísmico. Sin embargo, tomando en cuenta la facilidad de construcción y otras buenas propiedades físicas y mecánicas, la mampostería ha seguido siendo un material muy popular en la construcción de edificios de mediana y baja altura para vivienda, aun en zonas sísmicas, siempre y cuando se refuerce o confine adecuadamente (Alcocer, 1997).

Las construcciones de mampostería se basan, generalmente, en sistemas estructurales de muros con resistencia ante carga vertical que toma simultáneamente el cortante demandado por la carga lateral. En dichos sistemas también son necesarios elementos estructurales horizontales (losas y trabes) para distribuir las solicitaciones verticales de la estructura,

mediante un trabajo a flexión, hacia los muros de carga que quedan sujetos, entonces, a compresión vertical.

Durante un sismo, se presentan fuerzas inerciales en las estructuras. Entonces, las losas trabajan como diafragmas horizontales rígidos y los muros deben resistir las fuerzas de corte y flexión que les impone el movimiento del terreno. Cuando se revisa la resistencia de estructuras de mampostería ante cargas sísmicas, se hace necesario comparar la resistencia real para cargas laterales con las cargas inducidas por el sismo de diseño. Este último no sólo depende de la intensidad y otras características del movimiento del terreno, sino también de las características dinámicas de la estructura, que a su vez se ven modificadas significativamente por incursiones en el intervalo inelástico según establecen Tomazevic y Sheppard en 1986 (Alcocer, 1997).

El efecto de cargas laterales se puede considerar como la superposición de la flexión general de cada muro y del efecto de las restricciones al desplazamiento y a la rotación que el sistema de piso induce sobre el mismo. Para bajos niveles de carga lateral, el equilibrio del muro supuesto como doblemente empotrado, se logra con la presencia de dos momentos flexionantes en el plano del muro, uno en su base y otro en la parte superior.

Para cargas laterales significativas, aparecen grietas en las zonas de tensión, por lo que el muro no puede suponerse con las mismas condiciones de frontera y el equilibrio del mismo se establece mediante un corrimiento de la resultante hacia el extremo a compresión. Teóricamente, si el desplazamiento de la resultante la coloca más allá del extremo del muro, éste se voltea. Sin embargo, la rotación se limita, ya que el muro forma parte de una estructura, por tanto, debe cumplir con ciertas condiciones de compatibilidad de desplazamientos.

El corrimiento de la resultante provoca la aparición de fuerzas internas verticales adicionales, haciendo que el muro falle por cortante debido a tensión diagonal o por flexión debida a una compresión vertical en el extremo comprimido del muro, lo que ocurra primero. En algunas ocasiones, la contribución del panel de mampostería después de agrietarse se pierde casi por completo, ya que no se logra formar un puntal de compresión para transmitir las solicitaciones al marco de confinamiento. Con el agrietamiento del muro, ocasionado a veces por la flexibilidad de la estructura, se presentan concentraciones importantes de esfuerzos en las esquinas del marco de confinamiento que aceleran la penetración de la grieta diagonal en la columna. Si la columna se daña, la estructura se debilita drásticamente reduciendo su rigidez y capacidad de carga vertical y lateral para ciclos posteriores.

En los muros de carga, las fallas se deben a la fragilidad del material, a la falta de liga entre los elementos y a la falta de confinamiento. En este tipo de estructuras, la aparición de una grieta diagonal está seguida de la falla del elemento y, en ocasiones, de un colapso total si no existe confinamiento. La existencia de elementos de confinamiento mejora en mucho el comportamiento de estructuras con base en muros de carga, ya que la presencia de una mejor liga y el propio confinamiento obligan a que las eventuales grietas diagonales se mantengan con anchuras reducidas aun después de varias repeticiones de carga, como comentan Hernández y Meli en 1976 (Alcocer 1997).

2.2 Modalidades de la mampostería más comúnmente utilizadas en México

Conforme las civilizaciones han ido progresando, los requerimientos para crear edificaciones más rápidamente y más económicas, han creado diferentes opciones de construcción, de las cuales algunas de ellas deben resistir solicitaciones sísmicas. Sin embargo, la preocupación mayor es por reducir los costos y no por proponer estructuraciones competentes; lo que en no pocos casos ha llevado a técnicas de construcción de edificaciones que en efecto son más baratas, pero que en múltiples ocasiones no son capaces de resistir tales acciones.

Los sistemas constructivos para vivienda de mampostería que se han usado en México van desde la mampostería no reforzada, ya sea de adobe, piedra natural, ladrillo, bloque o tabicón, hasta la mampostería confinada y la mampostería con refuerzo interior, que se usan actualmente en construcciones más recientes. En este capítulo se describen estas tres modalidades de mampostería.

2.2.1 Mampostería no reforzada

Este tipo de mampostería se ha usado desde que el hombre comenzó a utilizar piedras naturales para definir su hábitat y ha ido evolucionando hacia el uso de mampostería de piezas artificiales tales como los ladrillos y bloques. Los materiales de mampostería pueden ser usados para una variedad de funciones en la construcción de edificaciones, aunque la utilización de la mampostería no reforzada se ha utilizado para cimentaciones, sistemas de piso, bóvedas, muros de distinta índole (carga, contención, contrafuertes, etc), y es muy común que se use para muros que forman parte de viviendas (figura 2.3).



Figura 2.3. Vivienda de mampostería no reforzada

De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería vigentes (NTCM-2004), esta modalidad de mampostería se considerará como muros no confinados ni reforzados, que aún contando con algún tipo de refuerzo interior o confinamiento (exterior o interior), no tiene el refuerzo necesario para ser incluidos en alguna de las categorías descritas en los capítulos 5 y 6 de las NTCM-2004.

Actualmente, en nuestro país este tipo de mampostería se usa principalmente en zonas marginadas y en aquéllos lugares en los que no se tiene una cultura de diseño sísmico. En las figuras 2.4 y 2.5 se presentan construcciones con base en este tipo de mampostería.



a) Piedra natural



b) Utilizando bloques de concreto

Figura 2.4 Ejemplos de construcciones de mampostería no reforzada



a) Adobe



b) Tabique de barro recocido

Figura 2.5. Ejemplos de mampostería no reforzada usada para muros

Las experiencias de sismos intensos recientes en México muestran una alta vulnerabilidad de este tipo de construcciones. Aunque es claro que sin elementos estructurales que le ayuden a la edificación a resistir fuerzas laterales, el nivel de vulnerabilidad aumenta. Sin embargo, también los daños observados en estas construcciones se deben a los materiales en sí, a una mala disposición de los elementos dentro de la estructura, a malos detalles de

conexión con otros elementos importantes dentro de la estructura como el sistema de techo, o a una combinación de los anteriores.

De los levantamientos de daños en sismos recientes, como por ejemplo, el de Manzanillo de octubre de 1995, el de Puebla de junio de 1999, y el de Tecomán de 2003, es muy evidente que en un mismo sector dentro de una población fuertemente golpeada por el sismo, las edificaciones de mampostería no reforzada sufren daños severos e incluso colapso, mientras que aquéllas que están debidamente confinadas prácticamente no presentan daño alguno. Este hecho apoya la idea de que con determinadas disposiciones de elementos dentro de la estructura, cuidando los detalles de conexión entre los elementos e incorporando un sistema de control de calidad durante la ejecución de la obra, es posible alcanzar niveles de seguridad aceptables para edificaciones de mampostería no reforzada de baja altura.

2.2.2 *Mampostería confinada*

La mampostería confinada fue creada en Italia después de los daños ocasionados por el sismo de 1908 de Sicilia (Alcocer, 1997). En México, la mampostería confinada es el tipo más empleado en la construcción de vivienda y edificios nuevos. La mampostería confinada suele presentar un comportamiento eficiente ante cargas sísmicas, como lo han constatado la gran variedad de estudios relativamente recientes acerca de esta forma de mampostería.

Las estructuras de mampostería de dimensiones considerables se pueden diseñar para tener un comportamiento adecuado ante temblores severos, siempre que se sigan cuidadosamente los requisitos de diseño y detallado que se mencionan en las NTCM-2004.

De acuerdo a las NTCM-2004, este tipo de mampostería se define como aquélla que se refuerza con castillos y dalas. Para ser considerados como confinados, los muros debe cumplir con los requisitos de la las secciones 5.1.1 a 5.1.4 de dichas normas. Los requisitos se resumen en las figuras 2.6, 2.7 y 2.8.

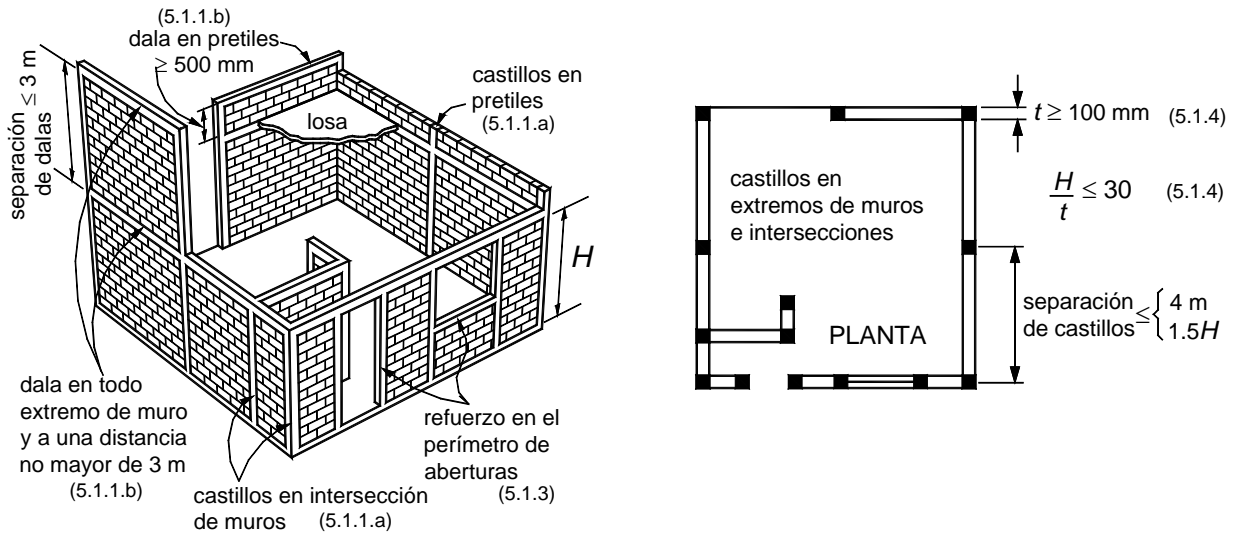


Figura 2.6. Requisitos para mampostería confinada (NTCM, 2004)

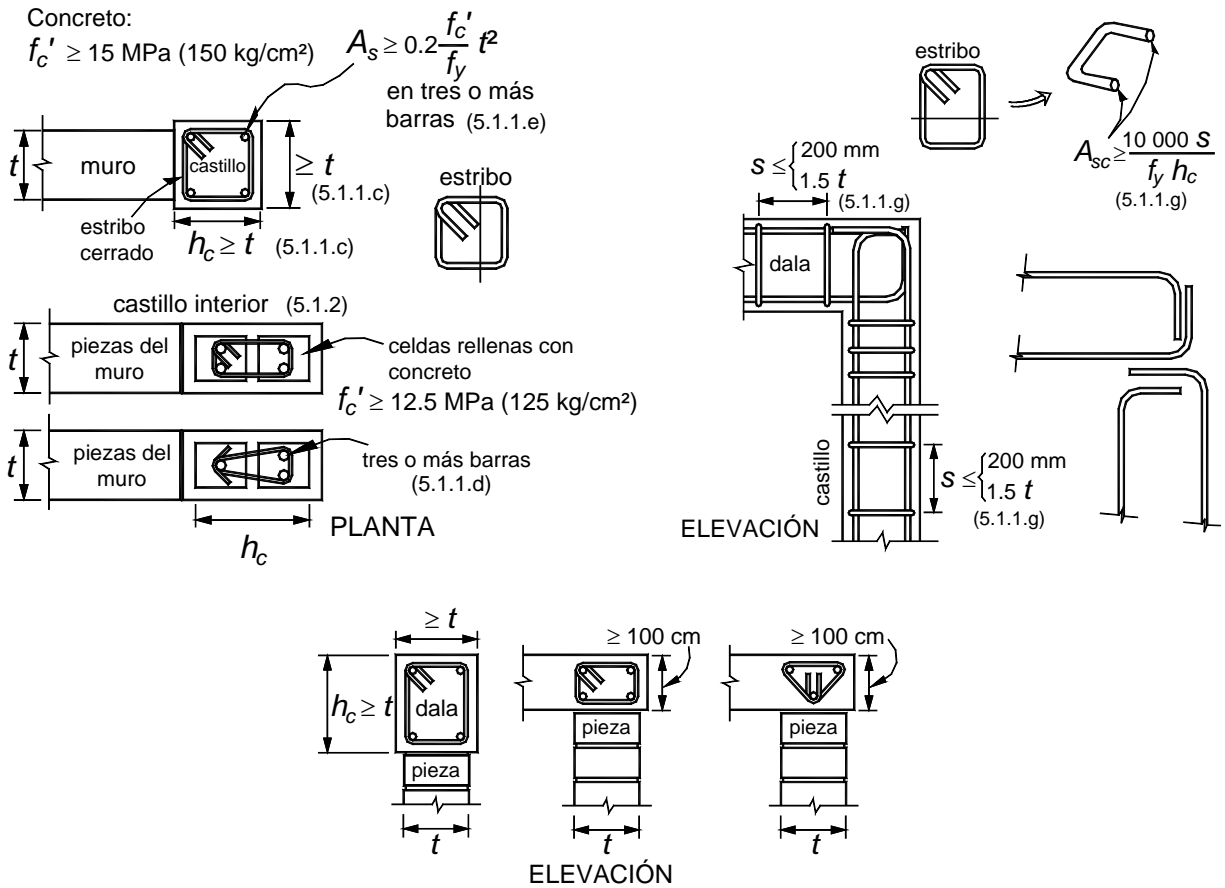


Figura 2.7 Requisitos para los castillos y dalas (NTCM, 2004)

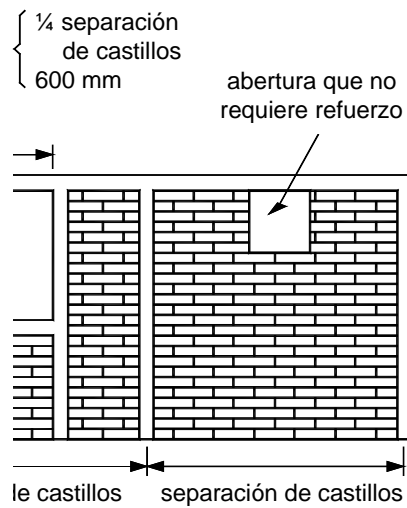


Figura 2.8 Refuerzo en el perímetro de aberturas (NTCM, 2004)

De acuerdo con los requisitos que se presentan las NTCM-2004, las viviendas de autoconstrucción, que son las que predominan en la República Mexicana, sólo satisfacen algunos de estos requisitos, por lo que sólo algunos muros de mampostería de estas construcciones se pueden considerar como confinados, ya que, por lo regular, de manera errónea no se confinan ventanas, puertas y parapetos (figura 2.9). El confinamiento se utiliza sólo en muros sólidos relativamente largos. En los lugares que se utilizan mochetas (muros esbeltos, relativamente cortos) equivocadamente no se acostumbra confinar. Debido a esta práctica las viviendas de autoconstrucción son edificaciones con un alto riesgo, susceptibles a sufrir agrietamientos considerables y, en algunos casos, donde el confinamiento es muy deficiente o nulo, acompañado de una densidad de muros baja, pueden estar en riesgo de colapso, puesto que la resistencia sísmica que presentan es menor a la que se espera que resista una estructura de mampostería confinada de acuerdo a las recomendaciones de las Normas vigentes.



Figura 2.9. Estructura típica de mampostería (mal) confinada

2.2.3 Mampostería con refuerzo interior

La mampostería reforzada surge como una alternativa de construcción para resistir acciones sísmicas importantes y ante la demanda de nuevos sistemas constructivos de mayor resistencia y capacidad de deformación.

Se ha observado que tanto la mampostería como el concreto son dos materiales muy semejantes que tienen resistencia a la compresión, pero resistencia prácticamente nula a la tensión, por lo que también la mampostería necesita de refuerzo transversal que le ayude a acomodar mejor los esfuerzos que en ella actúan, además de disipar más energía durante un sismo.

En la figura 2.10 se muestra una estructura de mampostería con refuerzo interior, que se ha popularizado en las últimas décadas, entre las construcciones de edificios de departamentos. Este tipo de construcciones tuvo un buen comportamiento durante el sismo de 1985.



Figura 2.10. Edificios de mampostería con refuerzo interior, Azcapotzalco, D.F.

De acuerdo con las NTCM-2004, esta modalidad se define como aquella con muros reforzados con barras o alambres corrugados de acero, horizontales y verticales, colocados en las celdas de las piezas, en ductos o en la juntas.

El acero de refuerzo, tanto horizontal como vertical, se distribuirá a lo alto y largo del muro; para que un muro pueda considerarse como reforzado deberán cumplirse los requisitos de las secciones 6.1.1 a 6.1.9 de las NTCM-2004. En las figuras 2.11, 2.12 y 2.13 se resumen los requisitos mínimos de refuerzo según estas secciones.

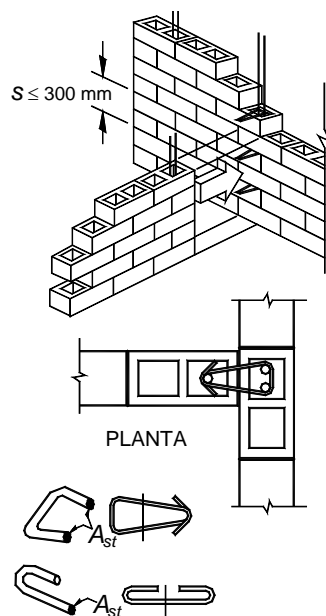


Figura 2.11. Conectores entre muros sin traslape de piezas (NTCM, 2004)

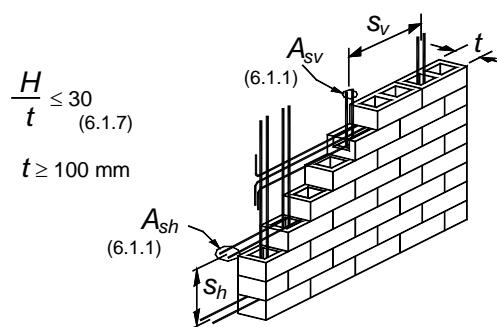
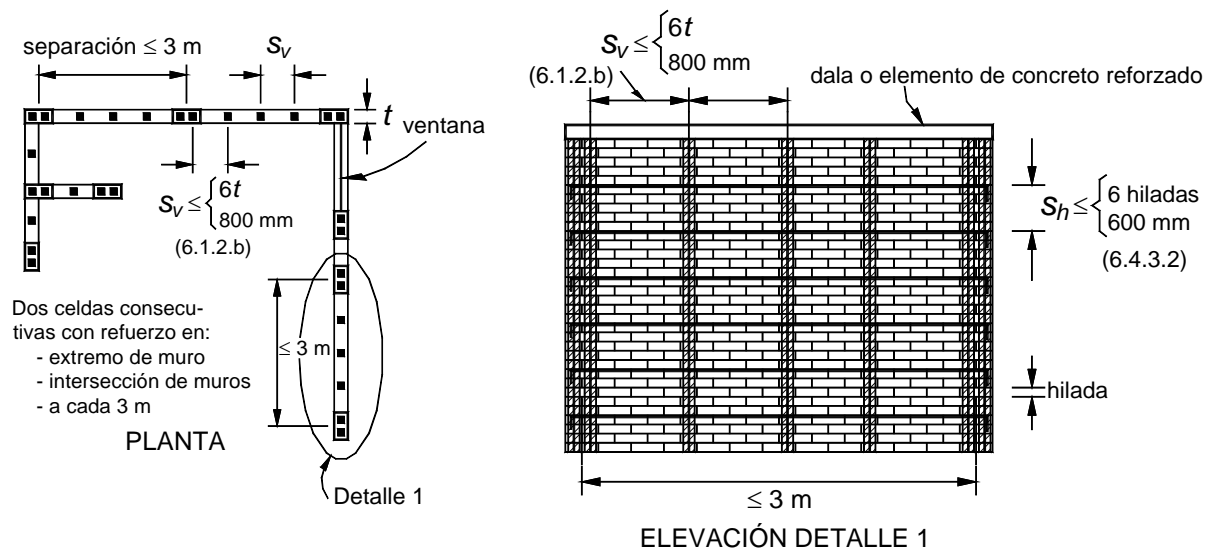


Figura 2.12. Requisitos para mampostería con refuerzo interior (NTCM, 2004)

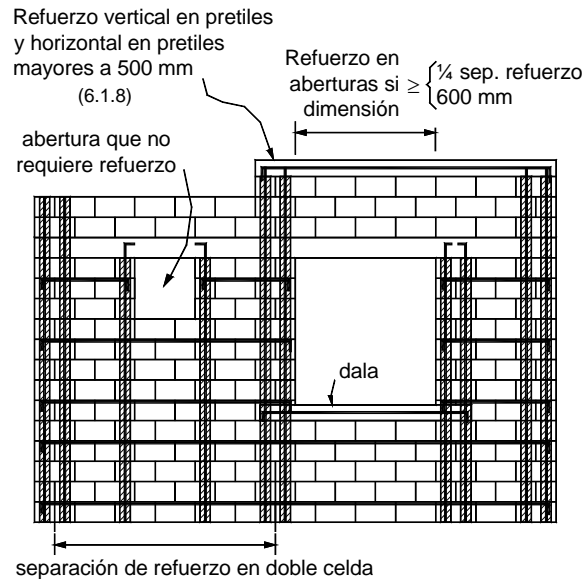


Figura 2.13. Refuerzo en aberturas y pretiles (NTCM, 2004)

2.3 Mampostería combinada y confinada

Entre las modalidades de mampostería más usadas en México podemos distinguir la mampostería confinada, siendo la más popular en zonas urbanas y conurbanas.

La demanda de viviendas en México, sobre todo en las zonas conurbanas de algunas ciudades, obliga a recurrir a nuevos sistemas constructivos que permitan un ahorro, tanto en costos de materiales como en tiempos de ejecución.

Uno de los nuevos sistemas desarrollados es mediante bloques sólidos de concreto ligero y tabiques de barro recocido, alternados en hiladas, al cual le hemos nombrado mampostería combinada. Este tipo de mampostería, que cae dentro de la confinada, permite un ahorro en costos y tiempos de ejecución, y la apariencia que ésta tiene es estética figura (2.14).



Figura 2.14. Mampostería combinada y confinada

La investigación experimental que se ha hecho sobre mampostería en México, no contempla a la mampostería combinada descrita anteriormente, por lo que surge la necesidad del estudio de esta modalidad constructiva, para valorar sus mecanismos de resistencia y deformación ante la eventual acción de sismos, ya que se está utilizando en zonas sísmicas de México.

2.3.1 Origen

Esta modalidad, que seguramente tiene su origen en algunas estructuras coloniales donde se alternaban hiladas de piedras naturales y ladrillos (figura 2.15) en la actualidad resurge principalmente por la iniciativa e inquietud de los habitantes de los estados donde se está usando (Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y Querétaro), quienes intentan resolver económicamente un problema de agrietamiento que presentan los muros de bloques (figura 2.16), por lo que decidieron alternarlos con ladrillos rojos para evitar la propagación de grietas en los bloques de concreto, funcionando en algunos de los casos, como el de asentamientos.



Figura 2.15. Estructura colonial del centro de Mérida, Yucatán.



Figura 2.16. Agrietamiento en muros de bloques sólidos de concreto ligero

El uso de este tipo de mampostería data de los años 80's, de acuerdo con la información recabada de los habitantes de estas construcciones, teniendo un auge en la década de los 90's. Este tipo de mampostería se ha venido extendiendo por varios lugares de la República Mexicana, entre ellos Oaxaca, y el Estado de México, que ya presenta en varios lugares el uso de esta modalidad. De hecho, comienza a utilizarse también en el Distrito Federal, y en Querétaro.

En las figuras 2.17 y 2.18 se presentan fotografías de mampostería combinada, en la que se observa el uso, y corrobora la información recabada, puesto que se está utilizando en bardas y segundos niveles de construcciones echas antes de los 90's, y también para construcciones nuevas.



a) Mampostería combinada (Tlaxcala)



b) Mampostería combinada Tlaxcala



c) Mampostería combinada (Puebla)



d) Mampostería combinada (Hidalgo)

Figura 2.17. Mampostería combinada en segundo nivel y bardas



a) Mampostería combinada, Edo. de Méx.



b) Mampostería combinada, Querétaro

Figura 2.18. Mampostería combinada encontrada en el Estado de México y Querétaro, (construcciones recientes)

2.3.2 Descripción de los materiales que la componen

Este tipo de mampostería confinada y combinada se fabrica principalmente con piezas de barro recocido (tabiques) y bloques sólidos de concreto ligero, los cuales se pegan mediante mortero a base de cemento, cal y arena con un espesor de junta entre 1 y 2 cm. La configuración que se sigue es de acuerdo a la persona o albañil que la construya, siendo la configuración más frecuente la mostrada en la figura 2.19, que consta de tres hiladas de tabique intercaladas con una de bloques.



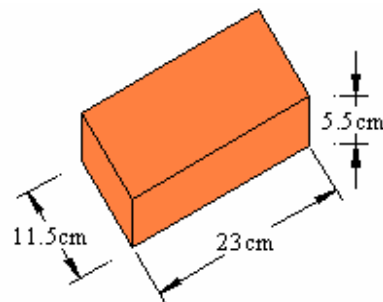
Figura 2.19. Configuración más usada de la mampostería combinada

Tabiques de barro recocido

Los tabiques de barro recocido que se utilizan son piezas fabricadas artesanalmente por gente de la región (figura 2.20). Los tabiques artesanales producidos en la zona de Puebla y Cholula son extensamente utilizados en los estados de Puebla, Tlaxcala y parte de la ciudad de México y los municipios aledaños a ésta que pertenecen al Estado de México.



a) Tabique rojo de barro recocido



b) Dimensiones

Figura 2.20. Tabique rojo de barro recocido.

Bloques sólidos de concreto ligero

Los bloques son piezas prismáticas como las que se muestran en la figura 2.21. Estas unidades de concreto ligero son manufacturadas mediante vibración de una mezcla de concreto seca embebida en moldes de metal, y retirándolo enseguida, y son curadas a la intemperie. Existe una gran variedad de este tipo de pieza en cuanto a color forma y textura, aunque las más utilizadas para la fabricación de muros de mampostería combinada son las que se muestran en la figura 2.21.

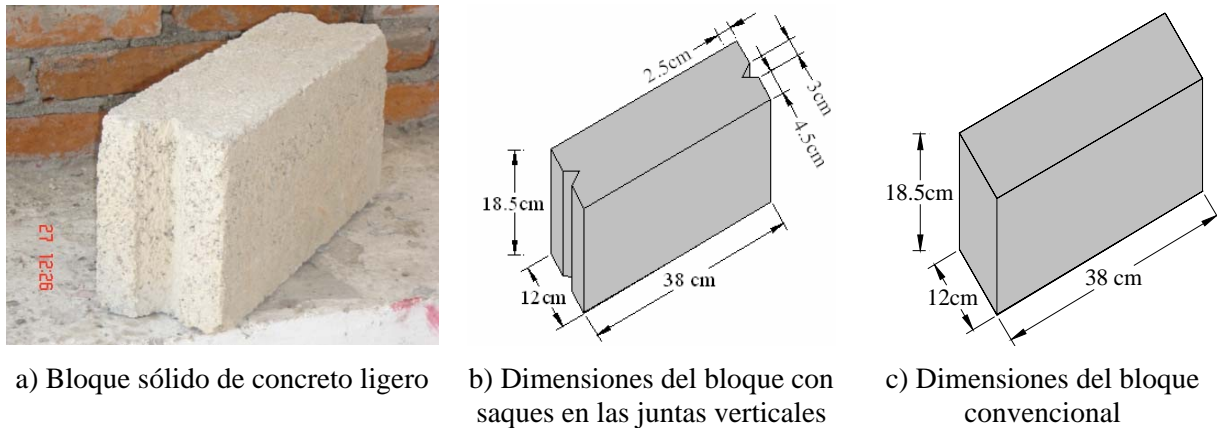


Figura 2.21. Pieza de bloque sólido de concreto ligero

Dentro de los agregados de tipo ligero que se encuentran en la naturaleza está el tepojal, que se está usando cada vez más como agregado en la fabricación de bloques de concreto ligero. Este tipo de piedra es un vidrio volcánico poroso y de textura espumosa, cuyo color varía del blanco grisáceo al amarillo. Abunda en nuestro país, principalmente en las cercanías del Distrito Federal, en Perote Veracruz y en los estados de Jalisco, Querétaro Coahuila, Colima, Guanajuato y Baja California (Saad, 1979).

2.3.3 Distribución geográfica de los lugares de su uso

Los estados en los que se ha observado el uso más frecuente de esta alternativa de construcción son el estado de Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Oaxaca, Estado de México y Distrito Federal, aunque también ya se ha observado en estados como Veracruz y Colima (figura 2.22). De acuerdo con la zonificación sísmica de la República Mexicana (figura 2.23), la mayoría de estos estados se ubican dentro de la región B y C (figura 2.23), que son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentes, pero que se ven afectadas por altas aceleraciones del suelo. Parte del estado de Oaxaca y todo Colima se encuentra dentro de la región D (figura 2.23), que es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente (alta sísmicidad).



Figura 2.22. Estados de la República Mexicana donde se está usando la mampostería combinada y confinada

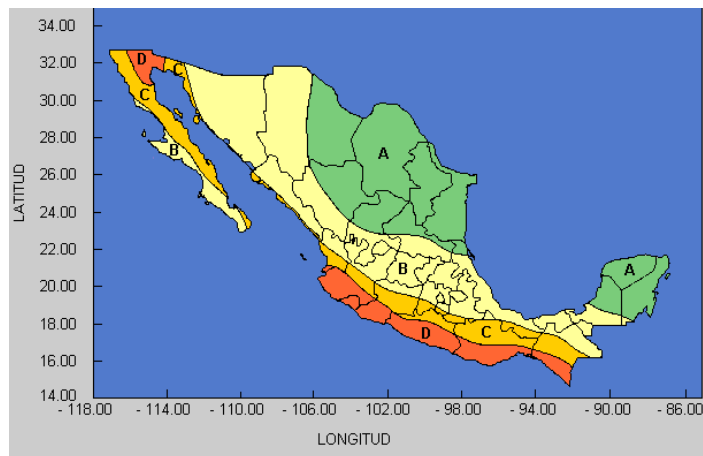


Figura 2.23. Regionalización sísmica de la República Mexicana (figura tomada de la página [http:// www.sss.unam.mx/SSN/sismos/región sísmica mx.html](http://www.sss.unam.mx/SSN/sismos/región_sísmica_mx.html))

2.3.4 Variantes

Dentro de las variantes en el uso de esta mampostería, se puede distinguir entre las diferentes configuraciones en el arreglo de las hiladas y en el uso que se le está dando.

Configuración de la mampostería combinada y confinada

La configuración más común observada en los lugares donde se está usando es la que se muestra en la figura 2.24, en la que se colocan tres hiladas de tabique de barro recocido por una hilada de bloque de concreto, debido en gran medida a la comodidad que el obrero tiene al pegar la mampostería, ya que, la dimensión en altura de las hiladas de tabique corresponden aproximadamente a la altura del bloque (figura 2.25).



Figura 2.24. Configuración más común de la mampostería combinada

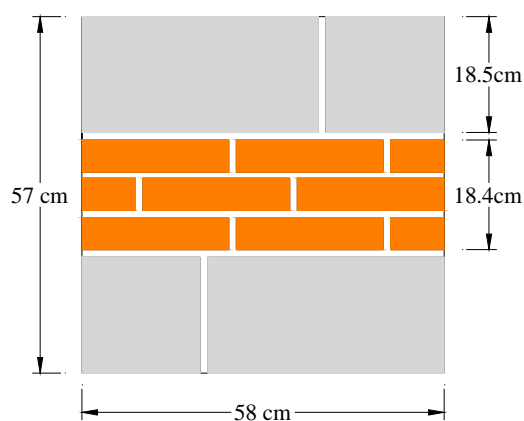


Figura 2.25. Comparación en las dimensiones del tabique con respecto a la del bloque

Las formas en que se coloca la mampostería varían de acuerdo al lugar y al gusto de las personas que construyen sus viviendas, ya que esta modalidad es de origen autóctono y en la mayoría de casos es de autoconstrucción, de ahí que de acuerdo a su experiencia se deciden por la forma más económica y estética para su edificación. Las variantes van desde una hilada de tabique por una hilada de bloque, y en algunos casos de tres por tres, en la figura 2.26 se muestran las variantes más frecuentes en la configuración de la mampostería combinada. En algunos casos hasta varían el color del bloque, lo que les brinda una mejor apariencia estética.



a) Una hilada de bloque por una de tabique



b) Dos hiladas de bloques por tres de tabique



c) Un hilada de bloque por dos de tabique



d) Uso de un bloque de color diferente

Figura 2.26. Variantes de mampostería combinada

Una variante excepcional que se encontró en Cuatitlán, Estado de México, es la que se ilustra en la figura 2.27, donde la mampostería se combina en un patrón de liga que en la literatura mundial se conoce como “Coursed Ashlar” (Schneider y Dickey, 1993), liga utilizada en muros de bloques de concreto cuyo antecedente data de construcciones medievales con muros de piedra natural de la Gran Bretaña (Tena 2004).



Figura 2.27. Variantes de mampostería combinada

Usos de la mampostería combinada y confinada

Los usos que la gente le ha dado a esta modalidad es principalmente como mampostería estructural, ya que la podemos ver como el sistema resistente en la mayoría de las construcciones que se muestran. Además, debido a su agradable apariencia, ha servido como fachada o acabado, ya que no necesita de un tratamiento adicional para lograr la apariencia estética que tiene. En la figura 2.28 y 2.29 se muestran algunos usos que se han observado, construcción de viviendas, bardas, edificios y hasta en bodegas.



a) Vivienda de dos niveles



b) Barda

Figura 2.28. Usos de la mampostería combinada



a) Edificio de tres niveles



b) Bodega

Figura 2.29. Usos de la mampostería combinada

Otras modalidades

En los últimos años han surgido una gran cantidad de mampostería artificial, con la que se ha combinado de acuerdo a los gustos de la gente y a los diseños arquitectónicos, que aunque no han tenido un despunte en su construcción, ya se pueden observar por varios puntos de la Ciudad de México y zonas conurbanas, que igualmente se está usando para muros en

viviendas y fachadas principalmente. Esta variante y los arreglos que presentan se muestran en las figura 2.30 y 2.31.



Figura 2.30. Mampostería combinada de adobe estabilizado con tabique de barro recocido



Figura 2.31. Mampostería combinada de adobe estabilizado con tabiques de barro recocido alternados en la misma hilada

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE DE LA MAMPOSTERÍA COMBINADA

A continuación se presentan las características y propiedades que deben cumplir los materiales que se utilizaron en el presente trabajo, y también se reportan valores obtenidos de las distintas pruebas realizadas, según la norma correspondiente.

Los materiales de mampostería empleados en la construcción de los muros fueron tabiques de barro rojo recocido y bloques sólidos de concreto ligero.

Los tabiques de Cholula Puebla son de los que más se comercializan en el Valle de México, su producción es artesanal y, por ende, el control de calidad que exhiben es muy malo y con una considerable variación en las propiedades.

Los bloques sólidos de concreto ligero se fabrican de forma mecanizada, pero no cuentan con un sistema de control de calidad. Están constituidos con base en arena y tepojal (el cual es un agregado de origen volcánico que es ligero y poroso y que no le ayuda en mucho a la resistencia de las piezas). Este tipo de piezas ha incursionado en el mercado con mucha eficacia, ya que se usa en la mayoría de los casos para autoconstrucción, en la que no se verifica su resistencia, el cliente sólo quiere ligerés, ahorro en los materiales y economía en su bolsillo, lo que este tipo de piezas les brinda.

Las propiedades del mortero, piezas, pilas y muretes de la mampostería de la investigación reportada en esta tesis corresponden específicamente a las piezas y mortero cuyo tipo y características se emplearon en la fabricación de los especímenes. En caso de cualquier variación de las propiedades de los materiales empleados o del proporcionamiento del mortero, se debe evaluar su efecto en la resistencia a compresión diagonal, en el módulo de elasticidad, en la resistencia a compresión y en la rigidez a cortante de la mampostería.

3.1 Propiedades de las piezas

3.1.1. Dimensiones de las piezas

Las dimensiones nominales de las piezas deben cumplir con la Norma Mexicana NMX-C-038 vigente, la cual establece la determinación de las dimensiones de ladrillos y bloques para la construcción.

En la NMX-C-404-1997-ONNCCE, se establecen las dimensiones nominales mínimas con las que se debe cumplir:

Dimensiones para bloques: las dimensiones deben basarse en el módulo de 10 cm, en múltiplos o submúltiplos, estando incluida la junta de albañilería de 1 cm de espesor. Dichas dimensiones mínimas deben de ser de 10 cm de altura y de ancho y 30 cm de largo. Las tolerancias en las dimensiones de las piezas no deben ser mayores de ± 3 mm en la altura y ± 2 mm en el largo y en el ancho.

En nuestro caso, las dimensiones promedio de la pieza de bloque utilizado son de 18 cm de altura, 12 cm de ancho y 38 cm de largo, que son mayores a las mínimas especificadas por la norma en cuestión.

Dimensiones para tabiques: las dimensiones nominales mínimas deben cumplir con las siguientes medidas: 5 cm de alto, 10 cm de ancho y 19 cm de largo con tolerancia de $\pm 4\%$, sin incluir la junta de albañilería.

Para este caso de estudio, las dimensiones promedio de la pieza de tabique utilizado fue de 5.5 cm de altura, 11.5 cm de ancho y 23 cm de largo, que cumplen con dicha norma.

Dimensiones de bloques, tabiques y tabicones en zona sísmica: La NMX-C-404 establece que, para zonas sísmicas donde se cuente con un reglamento de construcción local cuya vigencia sea posterior sismos de 1985 y que contenga disposiciones de diseño sismo-resistente, para estructuras de mampostería, regirán las disposiciones estipuladas en dichos reglamentos de construcción locales referentes a los requisitos de dimensiones nominales mínimas, áreas netas mínimas y espesores mínimos de paredes de piezas macizas y huecas. En caso contrario, regirán las especificaciones estipuladas en los párrafos anteriores.

Como podemos ver, las dimensiones de nuestra mampostería quedan dentro de la normativa vigente.

3.1.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se obtuvo de acuerdo a la NMX-C-036 vigente que especifica el método de prueba para determinar la resistencia a la compresión de ladrillos, bloques y adoquines de concreto.

Para obtener la resistencia del tabique se escogieron dos lotes diferentes, de procedencia del mismo lugar de abastecimiento. Las pruebas se hicieron en diferentes fechas, de acuerdo a la adquisición de los materiales. En la tabla 3.1 se resumen las resistencias obtenidas de estos lotes.

La resistencia de diseño se calcula como:

$$f_p^* = \frac{\bar{f}_p}{1 + 2.5 c_p} \quad (3.1)$$

donde:

- \bar{f}_p Media de la resistencia a compresión de las piezas, referida al área bruta
 c_p Coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas.

De acuerdo al tipo de fabricación de las piezas de mampostería, las NTCM-2004 establecen coeficientes de variación mínimos para los tabiques y bloques; por tratarse de mampostería de producción artesanal y fabricación mecanizada respectivamente, se tomó un coeficiente de variación de 0.35 y 0.30 para efectos de cálculo.

La tabla 3.1 presenta la resistencia a la compresión mínima de las piezas de acuerdo a la NMX-C-404-1997-ONNCCE, y la obtenida de nuestras piezas de tabique y bloques de concreto.

Tabla 3.1. Resistencia a la compresión de las piezas de mampostería

Tipo de Pieza	Resistencia mínima requerida [kg /cm2]	Resistencia promedio ¹ \bar{f}_p [kg /cm2]	c_p^1 mínimo por norma	c_p^1 experimental	Resistencia ¹ f_p^* [kg /cm2]
Tabique de barro recocido	60	113.8	0.35	0.07	61
Bloque sólido de concreto ligero	100	47.9	0.30	0.20	27.3

¹ Nota: los resultados de las pruebas a cada pieza se resumen en el apéndice A

Vemos que la resistencia f_p^* del tabique está por encima de la especificada por la norma. No podemos decir lo mismo de los bloques de concreto, ya que éstos exhibieron una resistencia pésima, estando por debajo de la mínima que se especifica en la NMX-C-404-1997-ONNCCE.

3.1.3. Contenido de humedad

Las piezas de mampostería utilizadas en este proyecto deben cumplir con los valores de absorción máxima de agua que establece la NMX-C-404-1997-ONNCCE. Para cumplir con dicha norma, se determinó el agua absorbida por el tabique y los bloques de acuerdo a la NMX-C-37 y a la NMX-C-404 (absorción inicial).

Las piezas de mampostería de acuerdo a la norma NMX-C-404 deben cumplir con los valores de absorción máxima de agua que se establecen en la tabla 3.2. En la tabla 3.3 se muestran los resultados de las pruebas de valores de absorción máxima de agua y de absorción inicial, que se obtuvieron de las piezas usadas en el presente trabajo.

La absorción máxima de agua durante 24 horas, se calculó con la ecuación 3.2.

$$Absorción = \frac{W_{24h} - W_s}{W_s} \times 100 \quad (3.2)$$

donde:

W_{24h} Peso del agua absorbida después de 24 horas de inmersión en agua fría
 W_s Peso seco de la pieza

La absorción inicial se determinó de acuerdo a la ecuación 3.3.

$$A_{m1} = 193.55 \frac{W_h - W_s}{Lb} \quad (3.3)$$

donde:

A_{m1} Absorción máxima inicial
 W_h Peso del espécimen (en g) después del periodo de contacto con el agua
 W_s Peso del espécimen en estado seco
 L Longitud del espécimen (en cm)
 B Ancho de la pieza del espécimen (en cm)

Tabla 3.2. Absorción máxima de agua (NMX-C-404)

Tipo de Pieza	Absorción máxima de agua en % durante 24 h
Tabique de barro recocido	13 - 21
Bloque sólido de concreto ligero	9 - 20

Tabla 3.3. Absorción de agua de las piezas de mampostería

Tipo de Pieza	Absorción ¹ % durante 24 h	A_{m1} ¹ g/min.
Tabique de barro recocido	17.8	64.2
Bloque sólido de concreto ligero	25.2	32.7

¹ Nota: los resultados de las pruebas a cada pieza se resumen en el apéndice A

Las piezas utilizadas cumplen con los valores de absorción máxima de agua que se establecen en la tabla 3.2. Para la absorción inicial se observa un alto índice de absorción inicial en las piezas de tabique, y en ambos casos rebasan el límite recomendado de 30 g/min,

por lo que en este caso se debería de saturar de agua las piezas de tabique y humedecer ligeramente los bloques, previamente a su colocación.

3.1.4. Coeficiente de saturación

En ausencia de norma mexicana, se usó la norma ASTM C67-91, la cual indica las cavidades secundarias que contiene un material (figura 3.1), lo que es bueno en climas extremos, sobre todo sujetos a bajas temperaturas y posibles congelamientos, porque permite acomodar de mejor manera deformaciones internas (Tena 2004).

$$CS = \frac{C}{B} = \frac{W_{24h} - W_s}{W_{5h} - W_s} \leq 1.0 \quad (3.4)$$

donde:

- C Peso de agua absorbida después de 24 horas de inmersión en agua fría
B Peso de agua absorbida después de 5 horas de inmersión en agua hirviendo

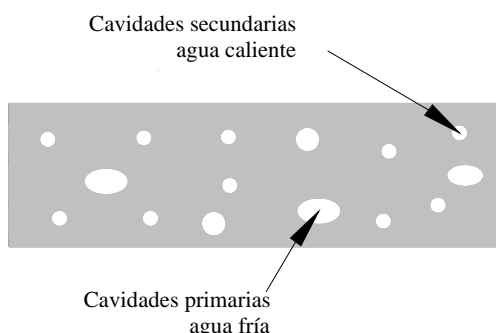


Figura 3.1. Cavidades saturadas en una pieza de mampostería

En la tabla 3.4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los bloques y tabiques, de acuerdo a lo que especifica la norma antes citada.

Tabla 3.4. Coeficiente de saturación de las piezas de mampostería

Tipo de Pieza	Coeficiente de saturación ¹
Tabique de barro recocido	0.98
Bloque sólido de concreto ligero	0.98

¹ Nota: los resultados de las pruebas a cada pieza se resumen en el apéndice A

Para ambas piezas el promedio de los resultados fue muy cercano a 1.0, y cabe señalar que para algunas piezas de bloques el valor fue ligeramente mayor a 1.0. Por lo tanto, y tomando en cuenta los índices de intemperismo de los Estados Unidos, estos ladrillos se pueden clasificar como NW (No Weathering), es decir, apropiados para climas templados o climas donde no se presentan temperaturas bajas (Tena 2004). Por lo tanto, para las condiciones ambientales que imperan en la mayor parte de la República Mexicana, en

particular el centro y el sur, estos valores son aceptables, pero hay que tener en cuenta que no debieran utilizarse en climas extremos del norte del país, debido a sus propiedades, en particular las del bloque.

3.1.5. Módulo de ruptura

El módulo de ruptura es el máximo esfuerzo de tensión o compresión en la fibra extrema del material ensayado a flexión. La norma ASTM C67-91, establece el método de prueba para el ensaye de las piezas de mampostería a flexión (Tena 2004). Es una prueba que mide la resistencia a la tensión de los tabiques.

Este valor se obtiene de la formula de flexión, ecuación 3.5.

$$f_r = \frac{M y}{I} = \frac{3 PL}{2 bt^2} \quad (3.5)$$

donde:

$$M = \frac{PL}{4}$$

El módulo de ruptura se revisó de acuerdo los valores mínimos que especifica la NMX-C-404, ensayando de acuerdo al método de prueba especificado por la norma ASTM C67 -91 (Tena 2004) en ausencia de norma mexicana para este caso. En la tabla 3.5 se resumen los valores obtenidos de la respectiva prueba.

Tabla 3.5. Módulo de ruptura de las piezas de mampostería

Tipo de Pieza	Módulo de ruptura mínimo kg /cm ²	Módulo de ruptura medido resistencia media ¹ kg/cm ²
Tabique de barro recocido	6	7.7
Bloque de concreto ligero	5	8.1

¹ Nota: los resultados de las pruebas a cada pieza se resumen en el apéndice A

La resistencia a tensión promedio de las piezas de mampostería sobrepasa la mínima especificada para cada pieza, cumpliendo con la tabla 4 de la norma mexicana NMX-C-404.

3.1.6. Peso volumétrico

El peso volumétrico se define como: el peso medio por unidad de volumen de los materiales que integran un conjunto estructural (Saad, 1979).

El peso volumétrico de las piezas usadas en el muro se determinó de manera sencilla, tomando de manera aleatoria el peso seco de cada una de las piezas que se le realizaron los

demás ensayos, y obteniendo un promedio del peso. Éste se dividió entre el volumen de la pieza, obteniendo así el peso volumétrico. Los resultados se presentan en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Peso volumétrico de las piezas de mampostería

Tipo de Pieza	Peso volumétrico ¹ ton /m ³
Tabique de barro recocido	1.58
Bloque sólido de concreto ligero	1.09

¹ Nota: los resultados de las pruebas a cada pieza se resumen en el apéndice A

3.2. Propiedades del mortero de pega

3.2.1. Dosificación del mortero usado

El mortero empleado fue Tipo I según las NTCM-2004 y se proporcionó, por tanto, conforme a las recomendaciones de la tabla 2.2 de dicha norma. La proporción usada de cemento, cal y arena fue 1:¼:3½.

Cabe señalar que ningún tipo de mortero usado para autoconstrucción se apega a esta tabla. En ocasiones se hace caso omiso de las recomendaciones de las normas de parte de la misma supervisión. La proporción en volumen aproximadamente que se usa en obras de autoconstrucción es ½:1:6, cemento, cal y arena respectivamente, debido a que no hay una supervisión en el mortero que se hace en obra, ya sea para mampostería de uso estructural o no. Los albañiles que trabajan en obras sin adecuada supervisión usan la dosificación anteriormente descrita, ya que les permite trabajar sin dificultades para pegar la piezas y para repellar los muros y hasta para rellenar los huecos (mampostería reforzada interiormente) y, según ellos, les ha dado buenos resultados.

El proporcionamiento en volumen del mortero que se utilizó en los ensayos aquí reportados es el especificado en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Proporcionamiento en volumen del mortero usado

Tipo	Partes de cemento hidráulico	Partes de cal hidratada	Partes de arena
I	1	¼	3.5

3.2.2. Resistencia a compresión del mortero

La resistencia a compresión del mortero de pega se determinó de acuerdo con el ensaye especificado en la norma NMX-C-061-ONNCCE. Se elaboraron seis cubos de mortero de una

muestra obtenida de cada bacha utilizada para fabricar las probetas. Se almacenaron y curaron en las mismas condiciones que las probetas a las cuales se les asociaron. El ensaye de los cubos se hizo a los 28 días aproximadamente.

La resistencia de diseño f_j^* , se calculó de acuerdo con la ecuación 3.6.

$$f_j^* = \frac{\bar{f}_j}{1 + 2.5 c_j} \quad (3.6)$$

donde:

- \bar{f}_j Media de la resistencia a compresión de cubos de mortero
 c_p Coeficiente de variación de la resistencia a compresión del mortero

La resistencia que se establece como mínima en las NTCM-2004 es de 40 kg/cm² y la asociada al mortero tipo I es de 125 kg/cm². En este caso el mortero usado exhibió una resistencia superior a la asociada al mortero tipo I de la NTCM-2004, salvo en el caso del mortero usado para la construcción de los muretes del arreglo 2, el mortero para este caso estuvo apenas por arriba del límite de 40 kg/cm². Los resultados se resumen en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Resistencia de los cubos de mortero

Mortero	Mortero tipo I NTCM-2004 \bar{f}_j [kg /cm ²]	Coeficiente de variación (cálculos) c_j	Coeficiente de variación ¹ (experimental) c_j	Resistencia de diseño ¹ f_j^* [kg /cm ²]
Pilas, Arreglo 1	125	0.20	0.09	140.7
Pilas, Arreglo 2	125	0.20	0.04	201.0
Muretes, Arreglo 1	125	0.20	0.09	167.2
Muretes, Arreglo 2	125	0.20	0.12	50.1
Muro MCC-1	125	0.20	0.03	205.7
Muro MCC-2	125	0.20	0.11	202.0

¹ Nota: los resultados de las pruebas a los cubos de mortero se resumen en el apéndice A

3.2.3. *Peso volumétrico del mortero*

El peso volumétrico del mortero se determinó dividiendo su peso entre su volumen y obteniendo el promedio de las doce probetas de mortero. El peso que se determinó no fue el seco, sino su peso a temperatura ambiente al momento de los ensayes hechos a los 28 días. En la tabla 3.9 se resume el peso volumétrico promedio del mortero.

Tabla 3.9. Peso volumétrico del mortero

Espécimen	c_v ¹	Peso volumétrico promedio ¹ ton /m ³
Mortero tipo I	0.09	1.57 ¹

¹ Nota: los datos se reportan en el apéndice A

3.3. Propiedades índice del ensaye de pilas

El comportamiento mecánico de los elementos de mampostería a compresión se determina a través del ensaye de pilas, fabricadas con piezas y mortero usados en los muros de mampostería.

3.3.1. Fundamentos de la prueba a compresión

La mampostería es un elemento constructivo con comportamiento similar al concreto simple, resistente a compresión y con una escasa capacidad a la tensión. Por ello, es de primordial importancia el determinar la resistencia índice a la compresión de la mampostería. Para reproducir experimentalmente el comportamiento a compresión simple, se elige un espécimen que tenga “la misma distribución de piezas y juntas” que el muro de mampostería real, sin confinamiento alguno.

El mecanismo de falla por compresión de la mampostería influye enormemente en el comportamiento de los muros de cortante de mampostería sujetos a fuerzas sísmicas en su plano (Priestley, 1990), por lo que es un parámetro muy importante en el diseño de construcciones sujetas a fuerzas laterales.

El proyecto de norma mexicana PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006 ¹ establece los métodos de prueba para la determinación de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro y de concreto. Los valores tanto de resistencia a compresión como del módulo de elasticidad se podrán utilizar en el procedimiento de diseño de estructuras de mampostería. Entre otras cosas, esta norma da recomendaciones sobre: máquina de prueba, cabezales de distribución de carga, dispositivo para medir el acortamiento, dimensiones, preparación de las probetas y el procedimiento de ensaye.

La prueba para determinar la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería a partir de pilas consiste en someter a las probetas a una carga de compresión en dirección perpendicular a las hiladas (figura 3.2).

¹ Industria de la construcción – determinación de la resistencia a compresión diagonal y rigidez a cortante de muretes y la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro o de concreto- método de prueba. En consulta publica

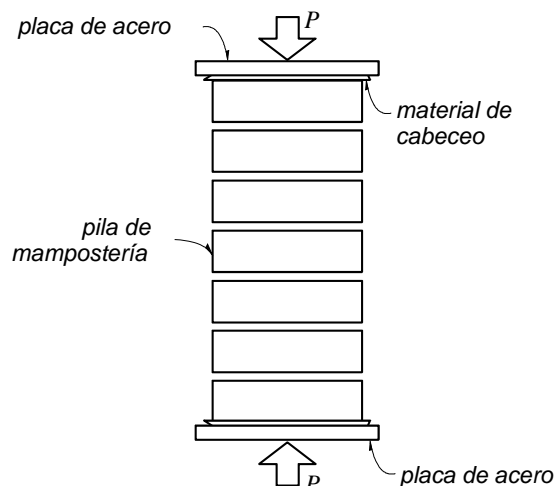


Figura 3.2. Pila para prueba a compresión (PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006)

3.3.2. Máquina de prueba

De acuerdo con el proyecto de Norma Mexicana PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006, la máquina de prueba debe contar con la capacidad suficiente y poder operar a la velocidad de aplicación de la carga especificada en el inciso 7.2 de dicha norma, sin producir impactos ni pérdidas de carga. La máquina de carga debe satisfacer los requisitos de la Norma Mexicana NMX-CH-027.

A continuación, se presentan las características de la máquina universal utilizada en los ensayos de pilas. Esta máquina (figura 3.3) se encuentra en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM):

Máquina: SSI – BALDWIN
 Modelo: WHV – 400
 Serie: No. 1039
 Capacidad: 400 000 lbf (181 tf)
 Indicador: Digital Readout (lbf) PASSED



Figura 3.3. Máquina universal de prueba

3.3.3. Dispositivo para medir el acortamiento en las pilas

Para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería se usaron dos transductores de desplazamiento (micrómetros de carátula) colocados en sentido longitudinal de la pila, uno en cada cara, los cuales cumplen con el valor de exactitud máxima de 0.02 mm, y se colocaron de manera que no restringieran el desplazamiento a lo largo de la vertical (longitud calibrada de la pila).

Para mantener en posición adecuada a los transductores para una correcta lectura, se utilizó el dispositivo metálico que se muestra en la figura 3.4, el cual consiste de marcos metálicos que se fijan a la probeta (figura 3.4). La deformación en la dirección de la carga se obtiene a partir de transductores de desplazamiento.

El proceso de cabeceo, curado, muestreo, colocación de la probeta y velocidad de la prueba se siguió de acuerdo a la norma correspondiente.

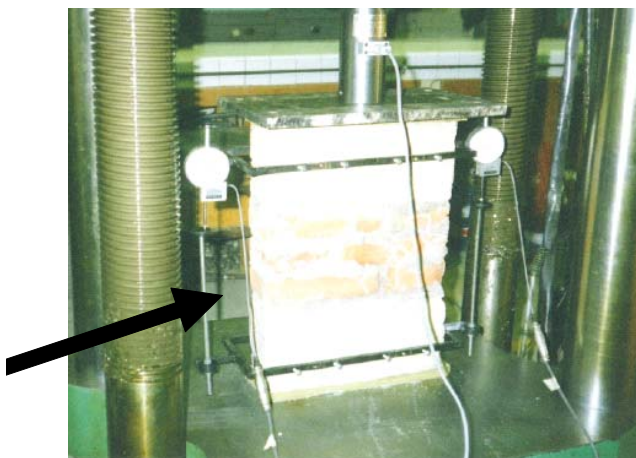


Figura 3.4. Dispositivo para medir el acortamiento longitudinal de una pila empleando marcos metálicos de referencia

3.3.4. Resistencia a la compresión

La resistencia de diseño a la compresión de la mampostería combinada, f_m^* , sobre el área bruta, se determinó de acuerdo a la sección 2.8.1.1 de las NTCM-2004 y al proyecto de Norma Mexicana PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006, que especifican un mínimo de nueve pilas. En este estudio se fabricaron un total de 18 pilas de acuerdo a los arreglos que se muestran en la figura 3.5. Se decidió construir el doble de lo mínimo que pide la NTCM-2004, debido a la forma en que se podían acomodar las piezas de tabique y los bloques concreto en la pila, y así tener resultados más confiables en el estudio.



Figura 3.5 Dimensiones y configuración de las pilas

La relación altura espesor de las probetas es de 4.78, que se encuentra dentro del intervalo que pide la norma (2 a 5).

El esfuerzo medio \bar{f}_m que se obtuvo de los ensayos de las probetas se corrigió multiplicándolo por el factor correctivo 1.038, el cual se determinó interpolando linealmente para las relaciones de esbeltez de la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Factores correctivos por esbeltez de las pilas (NTCM-2004)

Relación de esbeltez de la pila	2	3	4	5
Factor correctivo	0.75	0.90	1.00	1.05

La resistencia de diseño se calculó con la ecuación 3.7.

$$f_m^* = \frac{\bar{f}_m}{1 + 2.5 c_m} \quad (3.7)$$

donde:

\bar{f}_m Media de la resistencia a compresión de las pilas referida al área bruta
 c_m Coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las pilas

Tabla 3.11 Resumen de resultados de los ensayos de las pilas a compresión simple

Pilas de mampostería combinada	\bar{f}_m^1 esfuerzo medio	c_m^1	f_m^{*1} Kg/cm ²
Arreglo 1	32.0	0.15	23.3
Arreglo 2	26.25	0.17	18.5

¹ Nota: Los datos correspondientes a cada pila se presentan en el apéndice A del presente trabajo

3.3.5. Módulo de elasticidad

Una propiedad importante en los materiales es el módulo de elasticidad, el que se obtiene precisamente de pruebas a compresión simple.

Aunque es altamente cuestionable que la mampostería se pueda caracterizar como elástica lineal dada su gran heterogeneidad, para fines prácticos los reglamentos permiten utilizar esta propiedad para fines de análisis, entre ellos las NTCM-2004. Para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería en estudio se procedió de la siguiente forma (PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006):

- Se aplicó la carga de manera uniforme y continua.
- Se tomaron un número suficiente de lecturas de desplazamiento y de carga, con la ayuda de la celda de carga colocada en el extremo superior de las probetas, lo que permitió definir mediante interpolación o gráficamente el esfuerzo normal axial (σ_1) correspondiente a una deformación de 0.00005, así como la deformación correspondiente al 40% del esfuerzo normal máximo (σ_2). Se trazó la curva esfuerzo-deformación a partir de lecturas tomadas (figura 3.6). El informe completo de gráficas, correspondientes a cada una de las pilas, se detalla en el apéndice B.

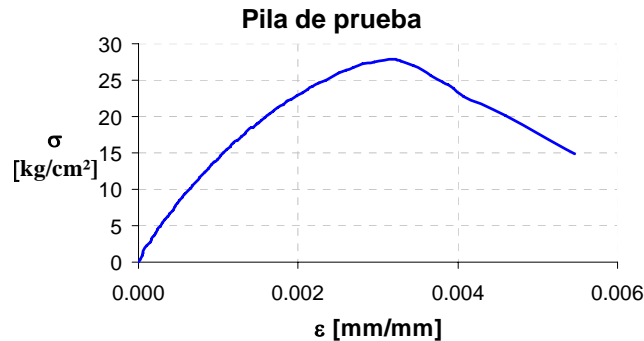


Figura 3.6. Curva esfuerzo deformación, obtenida de los ensayos de las pilas, Arreglo 1

Cálculos

El módulo de elasticidad, se calculó con la ecuación 3.8 obteniendo cada dato de las gráficas esfuerzo deformación unitaria correspondiente a cada pila, como se indica en la figura 3.7.

$$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (3.8)$$

donde

- E_m Módulo de elasticidad de la mampostería;
- σ_1 Esfuerzo axial correspondiente a 0.000050 de deformación;
- σ_2 Esfuerzo axial correspondiente al 40% de la carga máxima;
- ε_2 Deformación producida por el esfuerzo σ_2 .

La deformación ε se calculó como:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \quad (3.9)$$

donde:

δ Acortamiento medido a lo largo de la longitud calibrada; y
 l_0 Longitud calibrada medida entre apoyos de transductores (figura 3.7)

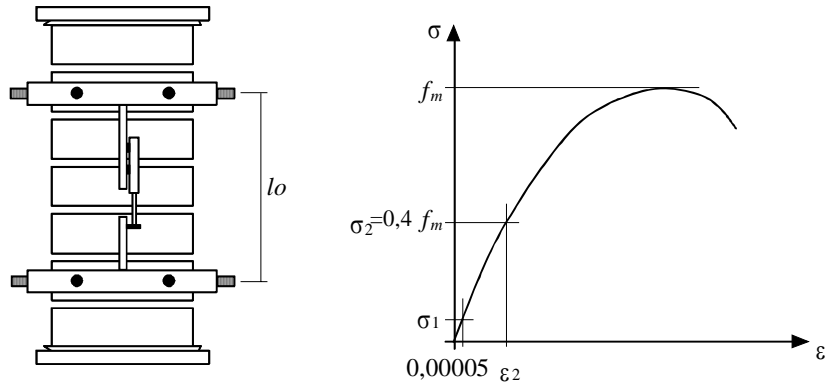


Figura 3.7. Determinación del módulo de elasticidad de la mampostería

Por lo que el módulo de elasticidad promedio de la mampostería combinada de las dos configuraciones es:

Tabla 3.12. Módulo de elasticidad de la mampostería combinada

Pilas de mampostería combinada	E_m^1 Promedio kg/cm ²	c_v^1
Arreglo 1	12714.0	0.23
Arreglo 2	11944.3	0.23

¹ Nota: los datos experimentales de cada pila se reportan en el apéndice A

3.3.6. Modos de falla

El modo de falla más común en una pila inicia con la aparición de grietas verticales de tensión lateral en los costados del material relativamente más resistente de mampostería de tabique o de concreto, que eventualmente cruzan todas las piezas que resulta en una falla debida a deformaciones transversales (Priestley 1990, Tena 2004). Confirmando esta teoría, en ambos arreglos de las pilas la falla más común que se presentó fue de grietas verticales, que comenzaban en el material más resistente, que en este caso era el tabique, extendiéndose al mortero y en algunas ocasiones hasta los bloques de concreto, como se ilustra en la figura 3.8.



a) Pila 1, Arreglo 1



b) Pila 2, Arreglo 2

Figura 3.8. Agrietamiento vertical en las pilas de mampostería combinada

En el ensaye de las pilas, también se presentaron fallas por aplastamiento en la que había concentración de esfuerzos en los extremos, ya sea del bloque en el caso del arreglo 1 (figura 3.9a) y del tabique en el arreglo 2 (figura 3.9b), debido a un mal acomodo de las pilas al momento del ensaye.



a) Pila 4, Arreglo 1



b) Pila 3, Arreglo 2

Figura 3.9. Falla por aplastamiento en las piezas de mampostería

3.4. Propiedades índice del ensaye de muretes

3.4.1 *Fundamentos de la prueba a compresión diagonal*

Las cargas laterales en un muro inducen esfuerzos de tensión diagonal que pueden causar la falla del muro. Existen muchas situaciones en las que un muro de mampostería se puede ver sometido a tensión diagonal. Desde luego una de las situaciones más importantes es cuando una edificación de mampostería se ve sometida a un efecto sísmico. Para estudiar el comportamiento de la mampostería en tensión diagonal se utiliza un ensaye de compresión diagonal (Meli 1971).

La prueba para determinar la resistencia a compresión diagonal la determina el proyecto de Norma Mexicana PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006. Consiste en someter a las probetas a una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales (figura 3.10). Durante

el ensaye, la carga vertical genera esfuerzos de tensión crecientes que se orientan perpendicularmente a la dirección de carga. Este campo de esfuerzos de tensión conduce a la falla del murete, a lo largo de una grieta aproximadamente vertical entre las dos esquinas cargadas.

Aunque se trate de un ensaye a compresión diagonal, el modo de falla es por tensión diagonal en prácticamente todos los casos, excepto en el que se tenga una adherencia muy pobre entre el mortero y la pieza de mampostería. La falla de un muro por efecto de fuerzas cortantes ocurre generalmente a través de grietas inclinadas debida a tensiones diagonales. Estas grietas se forman generalmente a lo largo de las juntas, propiciadas por la debilidad de la unión pieza – mortero. Sin embargo, para piezas con baja resistencia y buena adherencia con el mortero, las grietas atraviesan indistintamente piezas y mortero.

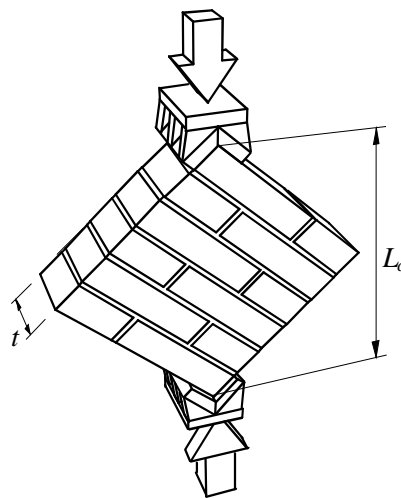


Figura 3.10. Murete para prueba a compresión diagonal (PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006)

3.4.2 Máquina de prueba

La resistencia a compresión diagonal de los muretes se llevó acabo en la máquina universal (figura 3.3) del laboratorio de estructuras de la UAM.

3.4.3 Dispositivo para medir el acortamiento y el alargamiento de las diagonales

Para determinar el módulo de rigidez a cortante se emplearon transductores de desplazamiento dispuestos sobre las diagonales de los muretes; éstos se colocaron de manera que midieran el desplazamiento relativo a lo largo de la longitud calibrada sobre las diagonales (alargamiento y acortamiento). El dispositivo sobre el que se colocaron los transductores se muestra en la figura 3.11, y consistió de marcos metálicos que se fijaron al murete.

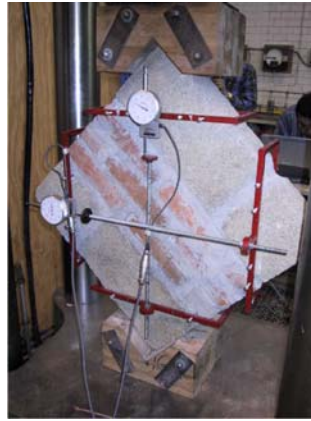


Figura 3.11. Dispositivo para medir el acortamiento y el alargamiento de las diagonales empleando marcos metálicos de referencia

Para verificar la verticalidad de la carga a compresión, los dispositivos se colocaron en la cara anterior como en la posterior de la probeta. La deformación angular de la probeta fue el promedio de las calculadas con ambos dispositivos.

3.4.4 Resistencia a compresión diagonal

Se determinó el esfuerzo cortante resistente a partir del ensaye de muretes (figura 3.12) con una longitud de al menos una vez y media la máxima dimensión de la pieza y con el número de hiladas necesario para que la altura sea aproximadamente igual a la longitud. Los muretes se ensayaron sometidos a una carga de compresión (figura 3.10) a lo largo de su diagonal y el esfuerzo cortante medio se determinó dividiendo la carga máxima entre el área bruta del murete medida sobre la misma diagonal.

Al igual que para las pilas, el ensaye a compresión diagonal se realizó a 18 muretes de mampostería combinada. Estos ensayos se dividieron en dos partes, nueve muretes de cada uno de los arreglos que se presentan en la figura 3.12. Los resultados de estos ensayos se presentan en el Apéndice A.

Para diseño, se utiliza un esfuerzo resistente, v_m^* , el cual se calculó con la ecuación 3.10.

$$v_m^* = \frac{\bar{v}}{1 + 2.5c_v} \quad (3.10)$$

donde:

- \bar{v} Promedio de los esfuerzos resistentes de los muretes ensayados.
- c_v Coeficiente de variación de los esfuerzos resistentes de los muretes ensayados.

El ensaye de los muretes se hizo con el procedimiento indicado en la sección 2.8.2.1 de las NTCM-2004 y al proyecto de Norma Mexicana PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006. En la figura 3.12 se muestra la configuración y las dimensiones de los especímenes ensayados. Los resultados de dichas pruebas se resumen en la tabla 3.13.

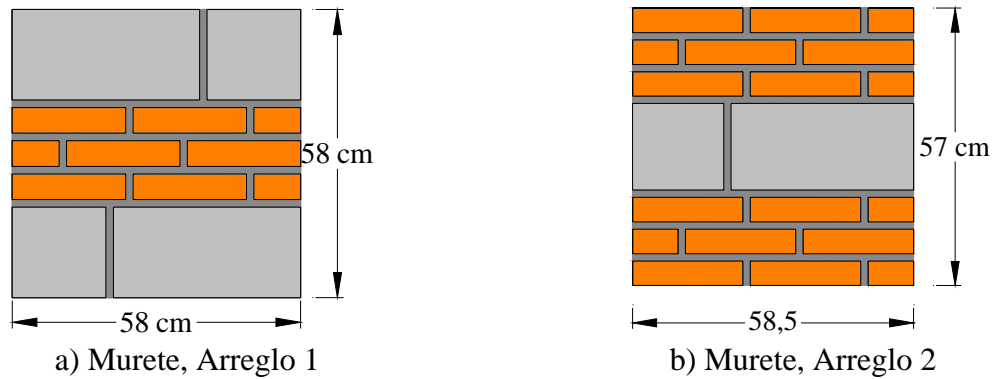


Figura 3.12. Dimensiones y configuración de los muretes

Tabla 3.13. Resumen de resultados de los ensayos de muretes a compresión diagonal

Muretes	\bar{v}_m^{-1} Kg/cm ²	C_v^1	v_m^{*1} Kg/cm ²
Arreglo 1	2.9	0.51	1.28
Arreglo 2	3.86	0.18	2.57

¹ Nota: los resultados de estos ensayos se presentan en el Apéndice A

Al igual que las pilas, para los muretes se trazó la curva esfuerzo-deformación para a partir de lecturas tomadas (figura 3.13). El informe completo de gráficas, correspondientes a cada uno de los muretes, se detalla en el apéndice B.

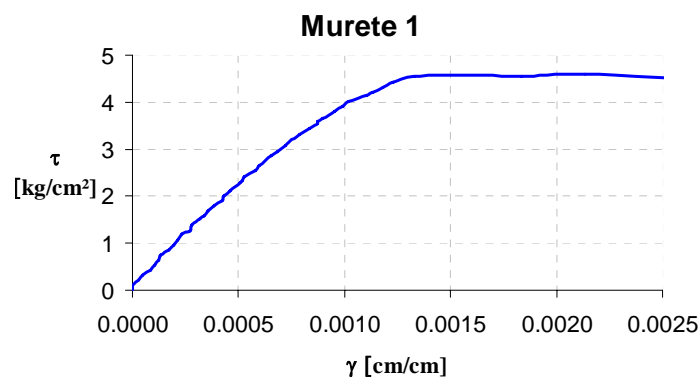


Figura 3.13. Gráfica esfuerzo deformación del murete 1, Arreglo 2

3.4.5 Módulo de rigidez a cortante

El módulo de rigidez a cortante de la mampostería, G_m , se calcula como se indica en la ecuación 3.11 PROYNMX-S/N-ONNCCE-2006. Los datos se obtienen de las curvas esfuerzo-deformación, correspondientes a cada ensaye de muretes, como se indica en la figura 3.14.

$$G_m = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - 0.00005} \quad (3.11)$$

donde:

- G_m Rigidez secante a cortante
- τ_1 Esfuerzo cortante correspondiente a 0.00005 de deformación angular
- τ_2 Esfuerzo cortante correspondiente al 40% de la carga máxima
- γ_2 Deformación angular producida por el esfuerzo τ_2

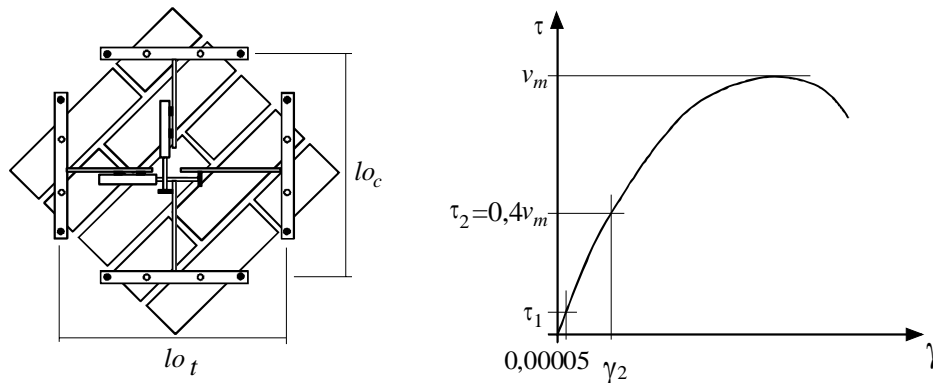


Figura 3.14. Obtención de la rigidez a cortante

La deformación angular γ se calcula como:

$$\gamma = |\varepsilon_c| + |\varepsilon_t| \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\delta_c}{lo_c} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\delta_t}{lo_t} \quad (3.14)$$

donde:

- ε_c Deformación de la diagonal a compresión
- ε_t Deformación de la diagonal a tensión
- δ_c Acortamiento medido sobre la longitud calibrada de la diagonal a compresión
- δ_t Alargamiento medido sobre la longitud calibrada de la diagonal a tensión

- l_{oc} Longitud calibrada, medida antes de la prueba, de la diagonal a compresión entre apoyos de transductores; y
- l_{ot} Longitud calibrada, medida antes de la prueba, de la diagonal a tensión entre apoyos de transductores (figura 3.14).

De acuerdo al procedimiento descrito, y a los resultados obtenidos de los ensayos a los diferentes arreglos de los muretes que se presentan en el apéndice A, la rigidez a cortante promedio para la mampostería combinada se resume en la tabla 3.14.

Tabla 3.14. Módulo de rigidez a cortante de la mampostería combinada

Muretes	G_m^1 Promedio Kg/cm ²	c_v^1
Arreglo 1	4283.8	0.45
Arreglo 2	4006.7	0.19

¹ Nota: los datos experimentales de cada murete se reportan en el apéndice A

3.4.6 Modos de falla que se presentaron

Tensión diagonal

Este tipo de falla se reconoce porque la grieta diagonal que se produce atraviesa indistintamente las piezas el mortero con una trayectoria aproximadamente recta (figuras 3.15a y 3.15d), la grieta empieza a formarse en correspondencia con el centro del muro y se prolonga rápidamente hacia los extremos (Meli, 1971).

Si el mortero es mucho más deformable que el tabique, los esfuerzos de tensión que se presentan en el mortero en el centro del elemento son mayores.

Considerando que la falla por tensión diagonal ocurre cuando las piezas son de baja resistencia y tienen buena adherencia con el mortero, y que de lo contrario la falla es debida a los esfuerzos tangenciales en las juntas.

Para los muretes con el arreglo 1, el modo de falla que predominó fue por deslizamiento de la mampostería (figura 3.15b), debido a una débil adherencia entre el mortero y las piezas de mampostería.

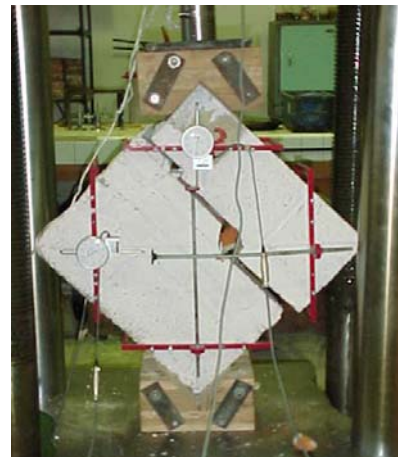
En los muretes del arreglo 2 el modo de falla predominante fue el de tensión diagonal (figura 3.15d), sólo en uno de los nueve muretes se presentó la falla por esfuerzos tangenciales en las juntas (figura 3.15c).

Esfuerzos tangenciales en las juntas

Cuando las piezas que constituyen el muro tienen alta resistencia, y además se conjunta que estos tienen una débil adherencia, antes que los esfuerzos de tensión diagonal provocados por la carga lateral excedan la resistencia de las piezas, ocurre que los esfuerzos tangenciales que induce la carga lateral vencen la adherencia entre el mortero y las piezas en las juntas, provocando un deslizamiento en las juntas y que se prolonga hacia los extremos.



a) Falla por tensión diagonal, Arreglo 1



b) Falla por deslizamiento, Arreglo 1



c) Falla por esfuerzos tangenciales, Arreglo 2



d) Falla por tensión diagonal, Arreglo 2

Figura 3.15. Modos de falla presentados en los ensayos de los muretes arreglo 2

3.5 Energía de deformación

Un material tiende a almacenar energía internamente en todo su volumen al ser deformado por una carga externa. Puesto que esta energía se relaciona con las deformaciones del material, recibe el nombre de energía de deformación unitaria (Hibbeler, 1998). En esta sección se determina la energía de deformación unitaria almacenada en un volumen elemental del material cuando la energía es ocasionada por un esfuerzo uniaxial.

Al formular la energía de deformación unitaria por unidad de volumen del material, se le llama densidad de energía de deformación unitaria (elástica), y se puede expresar como (Hibbeler, 1998):

$$u = \frac{\Delta U}{\Delta V} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon \quad (3.15)$$

si el comportamiento del material es elástico-lineal, es aplicable la ley de Hooke, $\sigma = E\varepsilon$, y por tanto podemos expresar la densidad de energía de deformación unitaria en términos del esfuerzo uniaxial como:

$$u = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \quad (3.16)$$

3.5.1. Módulo de resiliencia

Cuando el esfuerzo alcanza el límite de proporcionalidad, a la densidad de energía de deformación unitaria calculada con la ecuación 3.16, se le llama módulo de resiliencia, esto es:

$$u_r = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{lp}^2}{E} \quad (3.17)$$

En la región del diagrama esfuerzo deformación unitaria u_r es equivalente al área triangular sombreada bajo el diagrama (figura 3.16). La resiliencia de un material representa físicamente la capacidad de éste de absorber energía sin ningún daño permanente en el material (Hibbeler, 1998).

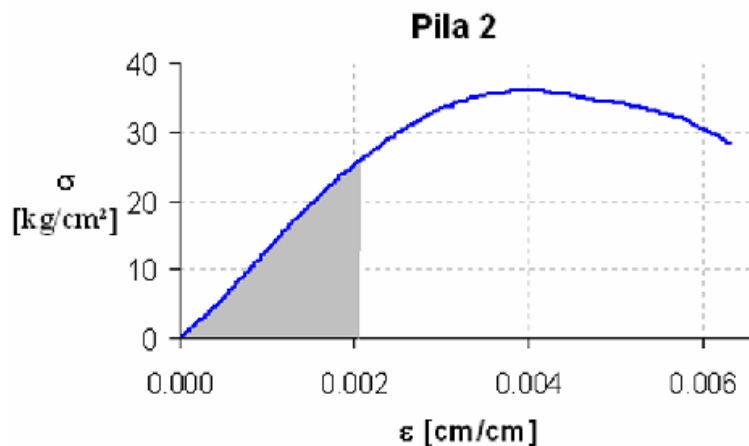


Figura 3.16. Concepto de módulo de resiliencia

De acuerdo a las gráficas obtenidas de los ensayos (apéndice B), las curvas correspondientes a cada probeta se ajustaron por el método de mínimos cuadrados, obteniendo

una ecuación para cada una de las gráficas, la cual se integró en el intervalo correspondiente a la zona “elástica” figura 3, para obtener el módulo de resiliencia de las probetas. En la tabla 3.15 se resumen los resultados de esta propiedad.

Tabla 3.15. Módulo de resiliencia de pilas y muretes de mampostería combinada

Espécimen	Módulo de resiliencia Valores U_t k-cm/cm^3
Pilas arreglo 1	0.025 ¹
Pilas arreglo 2	0.022 ¹
Muretes arreglo 1	0.00022 ¹
Muretes arreglo 2	0.00107 ¹

¹ Los cálculos se presentan en el Apéndice A

3.5.2. Módulo de tenacidad

Otra propiedad importante de un material es el módulo de tenacidad, u_t . Esta cantidad representa el área total dentro del diagrama esfuerzo deformación, figura 3.16, y por consiguiente representa la densidad de energía de deformación unitaria de un material que se comporta inelástica precisamente antes de que se fracture (Hibbeler 1998). Consideramos que esta propiedad es de suma importancia, ya que, nos da un parámetro de gran utilidad para el diseño de muros de mampostería, en los cuales la degradación de rigidez una vez agrietados es considerable.

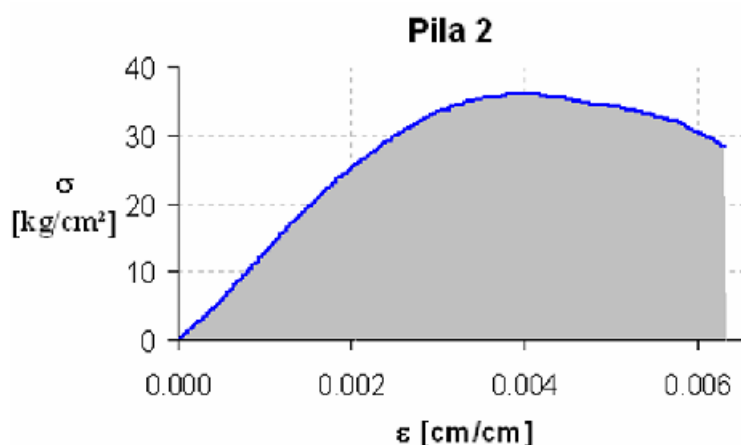


Figura 3.16. Concepto de módulo de tenacidad

Para el cálculo de esta propiedad, se procedió de igual manera que en el apartado anterior, sólo que ahora se integró a lo largo de toda la curva, para obtener la energía por unidad de volumen, que se necesita para ocasionar la ruptura. En la tabla 3.16 se resumen los resultados de esta propiedad.

Tabla 3.16. Módulo de tenacidad de las pilas y muretes de mampostería combinada

Espécimen	Módulo de tenacidad Valores promedio U_t Kg-cm/m^3
Pilas, Arreglo 1	0.105 ¹
Pilas, Arreglo 2	0.102 ¹
Muretes, Arreglo 1	0.00218 ¹
Muretes, Arreglo 2	0.03005 ¹

¹ Los cálculos se presentan en el Apéndice A

Se observa que tanto el módulo de resiliencia como el de tenacidad para ambos arreglos de pilas fueron similares, debido a que para esta prueba los modos de falla y las resistencias alcanzadas fueron del mismo orden, como se comentó en el apartado 3.3. Para los muretes, es marcada la diferencia entre los valores que se obtuvieron, esto debido al tipo de falla y la baja resistencia que exhibieron los muretes del arreglo 1.

Un análisis detallado de los cálculos para obtener la energía de deformación de pilas y muretes se presenta en el apéndice C.

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MUROS DE PRUEBA

De acuerdo con el Apéndice A de las NTCM-2004, en el que se especifica el ensaye de al menos un espécimen para cada configuración característica del refuerzo o condiciones de borde, en el presente capítulo se describe el diseño y la construcción de dos muros con características de refuerzo y borde similares, variando únicamente en la disposición de la mampostería en las hiladas.

4.1. Descripción de los especímenes

Se fabricaron dos muros de mampostería confinada y combinada de 2.30 X 2.30m, de ancho y longitud. Para la fabricación de dichos muros se usaron bloques sólidos de concreto ligero y tabiques de barro recocido con el arreglo que se muestra en la figura 4.1. La altura y el ancho de los muros de prueba estuvieron limitados por las características del dispositivo de carga.

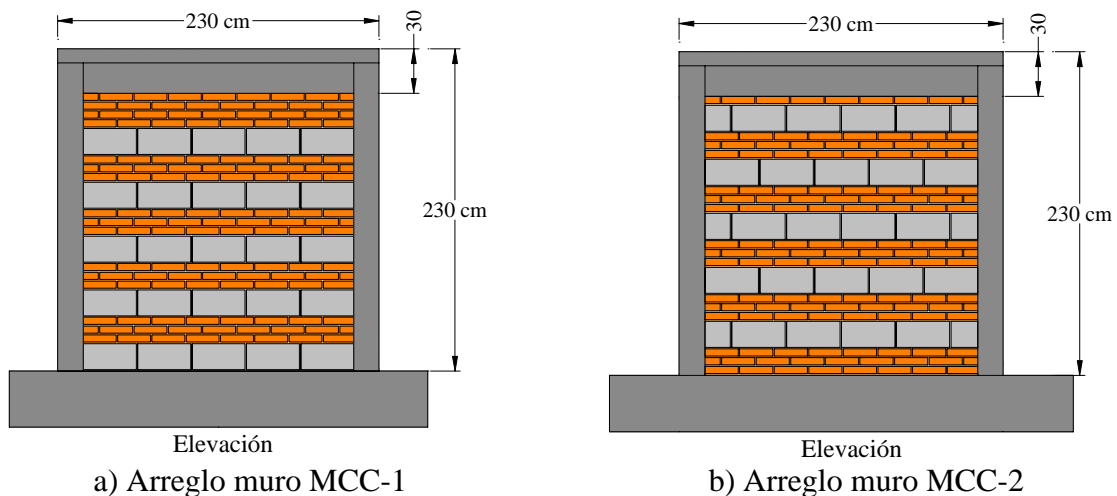


Figura 4.1. Arreglos de los muros de mampostería combinada

La clave asignada a cada espécimen se hizo de acuerdo al arreglo de la mampostería (**M**ampostería **C**ombinada y **C**onfinada, MCC), orden de ensaye (1 ó 2) y a las características de cada espécimen.

Se construyeron los especímenes de manera que sus características geométricas generales coincidieran lo más posible con las de muros de tabique rojo confinados ensayados previamente en el CENAPRED (modelo M-0-E6, Aguilar y Alcocer 1997), con la finalidad de poder hacer comparaciones entre estas distintas modalidades. De hecho, las dimensiones generales y características de los elementos confinantes y dala de cimentación fueron tomadas de informes publicados en dicha institución (informe de tesis de Aguilar, 1997 e informe de tesis de Zepeda, 2001), pero se adaptaron de acuerdo a las condiciones del dispositivo de carga del laboratorio de estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Por lo tanto, los muros se apoyaron sobre una viga de reacción de concreto reforzado, diseñada y fabricada *in-situ* (figura 4.2).

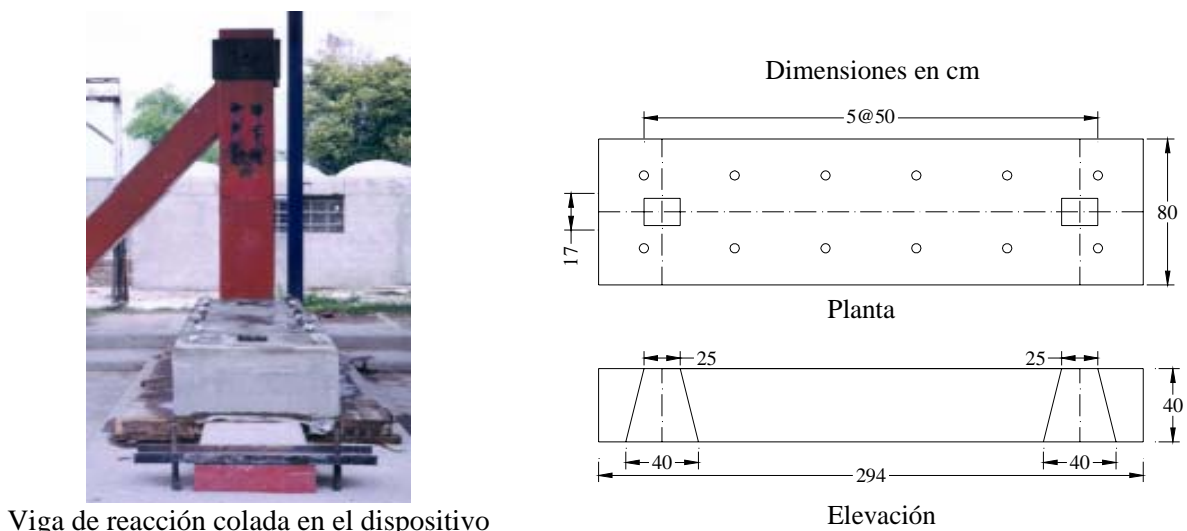


Figura 4.2. Detalles de la viga de cimentación

El confinamiento consiste de dos castillos de sección rectangular de dimensiones de 12 x 20 cm y un sistema de dala-losa en la parte superior. La sección de la dala fue de 12 x 30 cm y la losa de 80 x 10 cm de ancho y peralte, respectivamente. Los armados de estos elementos se especifican en las tablas 4.1 y se ilustran en las figuras 4.3.

Tabla 4.1. Características del refuerzo en los especímenes

Muro	Refuerzo en castillos		Refuerzo en dalas		Refuerzo en losas	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
MCC-1	4#3	E#2@20cm	4#3	E#2@20cm	4#3@15cm	16#4@15cm
MCC-2	4#3	E#2@20cm	4#3	E#2@20cm	4#3@15cm	16#3@15cm

#3: Acero de 3/8 de pulgada de diámetro, del grado 42 ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$)

E#2: Alambroón de 2/8 de pulgada de diámetro, del grado 22 ($f_y = 2200 \text{ kg/cm}^2$)

El refuerzo longitudinal provisto a dalas, castillos y losa consiste de cuatro varillas del # 3 (3/8" de diámetro) como acero longitudinal y de estribos del #2 a cada 20 cm para el acero

transversal. La figura 4.3 muestra en detalle el número de varillas separación entre el refuerzo longitudinal y el transversal en el caso de las dalas, castillos y losa.

Las cuantías calculadas con este tipo de refuerzo cumplen con los mínimos establecidos en la sección 3.3 de las NTCM-2004 para considerar un muro de mampostería como confinado.

El sistema dala-losa fue necesario para poder representar de una manera más aproximada el modelo con la realidad, y poder transmitir las cargas laterales y verticales al muro. En el modelo MCC-1 se coló por separado la losa y la dala, colocando a lo largo de esta, conectores de varilla del #4 para evitar el deslizamiento, al momento de la aplicación de la carga. Para el modelo MCC-2 se coló de forma monolítica el sistema dala-losa.

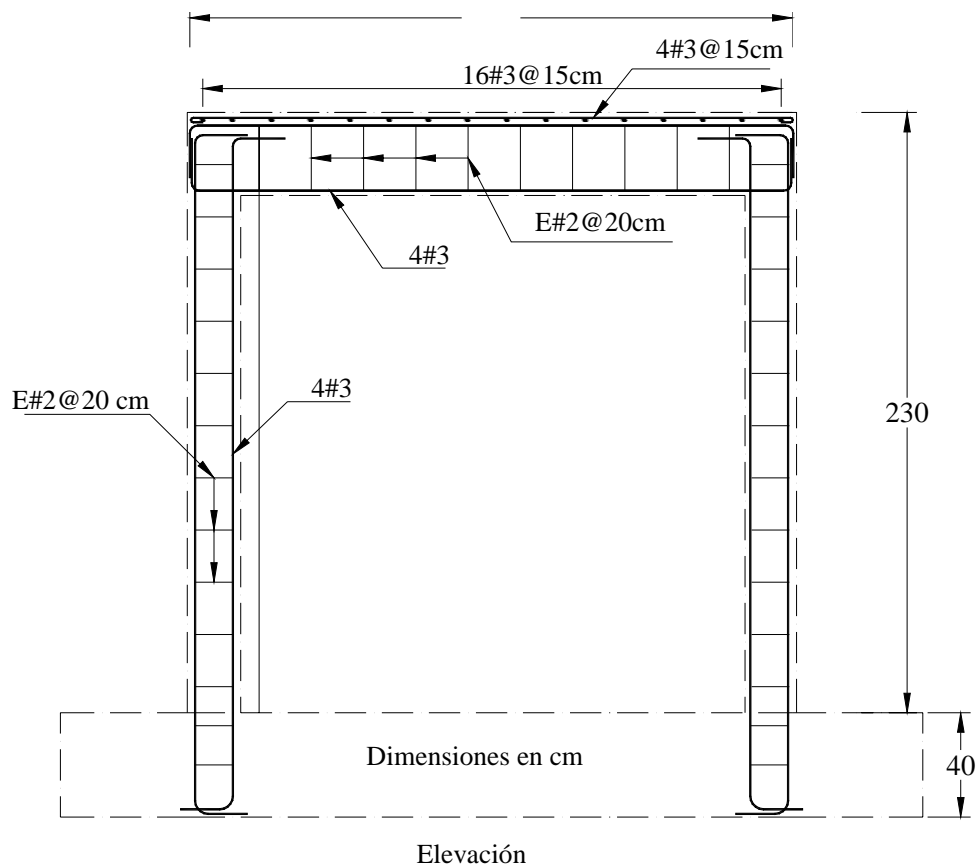


Figura 4.3. Armado de los elementos confinantes

En la figura 4.4 se muestra la geometría y dimensiones de los modelos de los muros, así como los detalles en planta y elevación.

Los materiales empleados en la fabricación de los muros fueron muestreados con objeto de determinar sus propiedades mecánicas (capítulo tres del estudio presente). El concreto utilizado en los elementos de confinamiento, así como en la losa y viga de reacción

se elaboraron en el laboratorio de estructuras de la UAM, con las dosificaciones pertinentes para que alcanzaran la resistencia de diseño. En la tabla 4.2 se resumen las resistencias de diseño y las obtenidas de los ensayos a los cilindros. (En el apéndice A, se reportan a detalle los resultados de los ensayos a compresión de los cilindros de concreto)

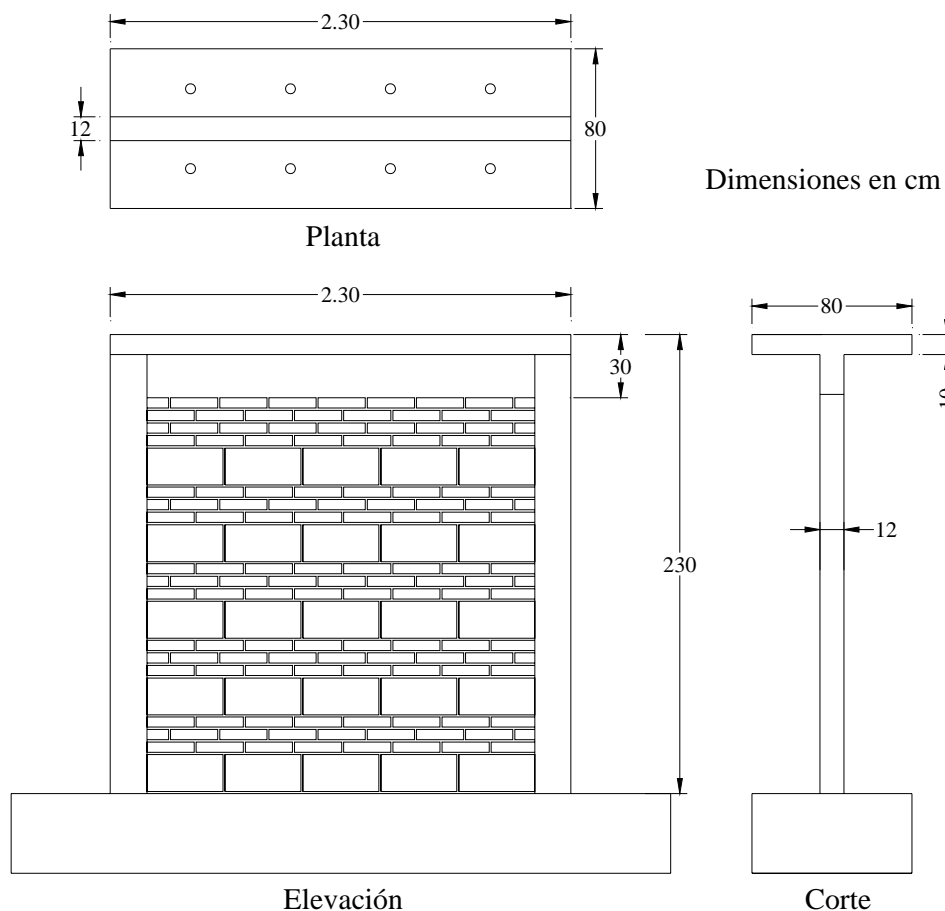


Figura 4.4. Geometría y dimensiones de los especímenes

Tabla 4.2 Resistencia promedio a la compresión de cilindros de concreto

Elemento estructural	Resistencia de diseño f'_c kg/cm ²	Especímen	
		MCC-1 Resistencia media kg/cm ²	MCC-2 Resistencia media kg/cm ²
Viga de reacción	300	340.8	341
Castillos	150	182.2	140
Dalas	250	239.9	248
Losa	250	242.8	248

En la tabla 4.3 se resumen las propiedades que se obtuvieron a partir de los ensayos, descritos en el capítulo tres, los cuales sirvieron como base para el diseño y predicción de los resultados del presente estudio.

Como parte de esta investigación se determinaron las propiedades de la mampostería combinada con base en dos arreglos diferentes de mampostería, los cuales se detallaron en el capítulo 3 de este estudio. En la tabla 4.3 se resumen las propiedades mecánicas.

Tabla 4.3. Propiedades mecánicas de la mampostería combinada

Parámetro de diseño	Arreglo 1	Arreglo2
	kg/cm ²	kg/cm ²
Resistencia a la compresión, f_m^*	23.3	18.5
Resistencia a fuerza cortante, v_m^*	1.28	2.57
Módulo de elasticidad, E_m	12714.0	11944.3
Módulo de cortante, G_m	4283.8	4006.7

4.2. Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo de los muros de prueba de mampostería combinada y confinada se llevó a cabo en el lugar de ensaye. En la figura 4.5 se ilustran etapas de la construcción del muro MCC-1, procediendo de forma similar en la construcción del espécimen MCC-2, variando únicamente en la disposición de las hiladas (comenzando con el tabique de barro recocido), con el objeto de reducir el número de variables involucradas en la investigación.

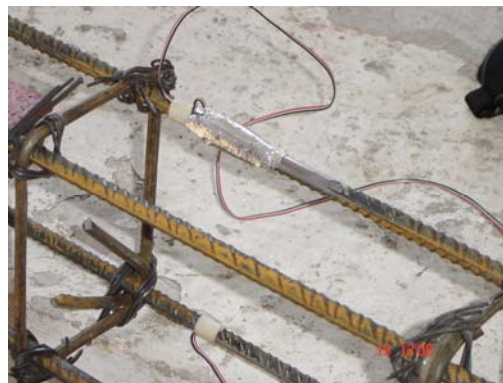
Primero se procedió a construir la viga de cimentación sobre la base de reacción del dispositivo de ensaye, colocando nylon entre ambos elementos para evitar que se adhirieran. En este elemento se dejaron dos boquetes con las dimensiones presentadas en la figura 4.2, con el objetivo de empotrar los castillos y poder representar el ensaye en voladizo de forma más real. El segundo paso era el armado de los castillos y la dala, los cuales se instrumentaron en los lugares indicados en la figura 4.5a, posteriormente se empotraban los castillos en la cimentación y se procedía a construir el muro con las características de cada espécimen, dentando los extremos de los ladrillos que estarán en contacto con los castillos hilada por hilada, porque si el dentado se hace una vez terminado el muro, se pueden debilitar la junta (reduciendo la adherencia). Los bloques, al contar con una hendidura que fomenta el anclaje mecánico con los castillos, no fueron dentados (figura 2.21b). Toda vez que se tenía el muro completo y dentado, se procedía a colar los elementos confinantes, primeramente los castillos y enseguida la dala y la losa.

Cabe mencionar que la mampostería del muro MCC-1 se fabricó en dos etapas, primero se levantó hasta una altura de 1.40 m aproximadamente, enrasándolo a la altura requerida al siguiente día. Para el segundo muro (MCC-2), esta etapa fue en un solo día.

La viga de cimentación consta de un anclaje de ocho vástagos de varilla del No. 8 con cuerda en los extremos, que se atornillan por debajo y a nivel del piso de reacción, y su función es restringir su deslizamiento y rotación al aplicar la carga, es decir, proporcionar una condición de frontera de empotramiento. En la figura 4.2 se presentan sus dimensiones, así como la ubicación de los orificios que permiten el anclaje al dispositivo de reacción.



a) Construcción de la viga de reacción



b) Instrumentación en el refuerzo longitudinal



c) Viga de reacción colada en el dispositivo



d) Construcción del muro MCC-1



e) Colocación de la dala



f) Colado de la dala y losa

Figura 4.5. Etapas de la fabricación del muro de prueba

4.3. Criterios de diseño

Para garantizar la reproducción del tipo de falla que se presenta comúnmente en las estructuras de mampostería ante las acciones sísmicas, se evaluó la resistencia a corte y flexión de los muros.

Los dos modelos se diseñaron de acuerdo a lo observado en la práctica de autoconstrucción (sección 2.3) y a los lineamientos de las NTCM-2004 en cuanto a las características de castillos, dalas y mortero de pega (tipo I) para muros confinados. Además, como ya se mencionó anteriormente, las dimensiones de la losa de concreto reforzado y sus características se establecieron para ser lo más idénticas posibles a las de los modelos de tabique rojo recocido de dimensiones similares ensayados previamente en el CENAPRED.

4.4. Predicción de resultados

4.3.1. Fuerza cortante resistida por la mampostería confinada

Con el fin de contar con un estimado de la resistencia de los especímenes, se usó la expresión de las NTCM-2004 para calcular la capacidad de muros a cortante, la que está calibrada para obtener la carga de agrietamiento de muros de mampostería confinada basados en un solo tipo de pieza. La fórmula de cálculo usada se presenta en la ecuación 4.1.

$$V_{mR} = F_R (0.5v_m^* A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R v_m^* A_T \quad (4.1)$$

donde:

F_R	Factor de reducción de resistencia, se tomó igual a 1.0 para la predicción en estos ensayos;
P	Carga vertical de compresión sobre el muro;
v_m^*	Resistencia a compresión diagonal de la mampostería; y
A_T	Área transversal del muro (área en planta = longitud por espesor del muro)

Tomando las propiedades mecánicas de la tabla 4.3, se realizaron los cálculos correspondientes para obtener la resistencia a cortante de la mampostería combinada de cada uno de los arreglos de los muretes ensayados. La carga vertical de compresión aplicada a los muros fue de 2.2 ton aproximadamente, para un esfuerzo de compresión promedio de 0.8 kg/cm². En la tabla 4.4 se resume la resistencia lateral nominal aproximada de los especímenes, calculada con la expresión 4.1.

Tabla 4.4. Resistencias nominales calculadas

Muretes	A_T cm ²	P kg	F_R	ν_m^* kg/cm ²	V_{mR} kg
Arreglo 1	2760	2229.6	1	1.28	2435.3
Arreglo 2	2760	2000.0	1	2.57	4215.5

4.3.2. Resistencia a flexocompresión en el plano del muro

Considerando la posibilidad de una falla a flexión, se estimó el momento nominal conforme al método optativo de las NTCM-2004 sección 5.3.2.2, ya que, los muros contaban con el acero longitudinal de los castillos colocado simétricamente en los extremos. Se utilizaron las siguientes ecuaciones, dependiendo del caso:

$$M_R = F_R M_0 + 0.3 P_u; \quad \text{si} \quad 0 \leq P_u \leq \frac{P_R}{3} \quad (4.2)$$

$$M_R = (1.5 F_R A_s f_y d' + 0.15 P_R d) \left[1 - \frac{P_u}{P_R} \right]; \quad \text{si} \quad P_u \geq \frac{P_R}{3} \quad (4.3)$$

donde:

$M_0 = A_s f_y d'$ Resistencia a flexión pura del muro

A_s Área total de acero de refuerzo longitudinal colocada en cada uno de los castillos extremos del muro

d' Distancia entre centroides del acero colocado en ambos extremos del muro

d Distancia entre el centroide del acero de tensión y la fibra a compresión máxima

P_u Carga axial de diseño a compresión, cuyo valor se tomara con signo positivo en las ecuaciones 4.2 y 4.3

F_R Factor de resistencia, se tomó igual a 1.0 para la predicción en estos ensayos

Se determinó la resistencia a compresión del muro de acuerdo a la ecuación 5.3 de las NTCM-2004:

$$P_R = F_R F_E (f_m^* A_T + \sum A_s f_y) \quad (4.4)$$

donde:

F_R factor de resistencia, se tomó igual a 1.0

F_E Factor de reducción por efectos de excentricidad y esbeltez, se tomó igual a 0.6

$$P_R = 48 \text{ ton} > P_u$$

De acuerdo a las propiedades de la mampostería y a la carga de diseño la ecuación que rigió fue la 4.2, los resultados se reportan en la tabla 4.5

Tabla 4.5. Resistencia nominal a flexo-compresión calculada para los muros de prueba

Muro	A_T m ²	P_u ton	F_R	F_E	$f_m^{*(1)}$ cm ²	f_y kg/cm ²	A_s cm ²	M_0 ton-m	M_R ton-m	H m	$V^{(2)}$
MCC-1	0.28	2.23	1	0.6	20.6	4200	2.84	25.2	26.5	2.3	11.5
MCC-2											

⁽¹⁾ Media de la resistencia a compresión de la mampostería combinada, correspondiente a los dos tipos de arreglo ensayados

⁽²⁾ Cortante asociado al momento nominal resistente por flexo-compresión

CAPÍTULO 5

INSTRUMENTACIÓN DE LOS MUROS DE PRUEBA

Con la finalidad de poder realizar posteriormente comparaciones entre la mampostería combinada y confinada, con la modalidad de mampostería confinada más utilizada en México, los muros de este estudio se instrumentaron, en la medida de lo posible, de manera similar y en los mismos sitios que en los muros de ladrillo confinados ensayados en el CENAPRED durante los años noventa.

De acuerdo a los experimentos realizados en el Laboratorio de Estructuras Grandes del CENAPRED, la instrumentación que utilizaron ha servido para recabar información útil en el estudio posterior de la mampostería. Con base en estos estudios, los muros de mampostería combinada y confinada se instrumentaron similarmente, tanto interna como externamente, mediante el uso de deformímetros eléctricos (strain gages) y transductores de desplazamiento, para estudiar su comportamiento local y global de los especímenes. La instrumentación se dividió en exterior e interior y se describe a continuación.

5.1 Instrumentación externa

La instrumentación externa estaba constituida por nueve micrómetros de desplazamiento de carátula (figura 5.1) y de una celda de carga (figura 5.2).



Figura 5.1. Micrómetro de carátula



Figura 5.2. Celda de carga

Los micrómetros se colocaron en puntos estratégicos, como se muestra en la figura 5.3, esto con el fin de medir deformaciones de flexión y distorsiones angulares.

La deformación angular de los tableros se calculó a partir de las lecturas de los micrómetros ubicados sobre las diagonales de los muros (M5 y M6). La rotación local en la base de los castillos se registró con dos micrómetros ubicados en los extremos inferiores de los castillos (M1 y M3). También se colocaron micrómetros para medir el deslizamiento del muro en su base (M4) y el posible deslizamiento de la viga de cimentación (M8), para medir la distorsión (M2 y M7) así como también el desplome durante la prueba (M9).

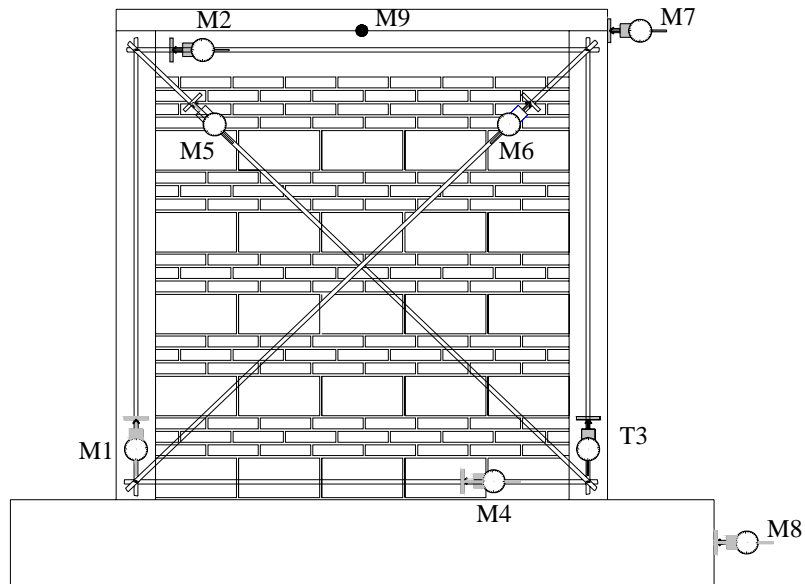


Figura 5.3. Instrumentación externa usada en ambos muros

En la figura 5.4 se muestra la colocación del tipo de micrómetros, así como la ubicación en el muro de algunos de ellos.



Micrómetro M1



Micrómetro M6(izquierda) y M3(derecha)

Figura 5.4. Ubicación de micrómetros colocados en los dos especímenes de prueba

Dentro de la instrumentación externa, se colocó una celda de carga para el segundo muro MCC-2, con la que se logró tomar lecturas electrónicamente y tener una correspondencia de datos más precisa. En la figura 5.5 se muestra la ubicación de esta celda de carga

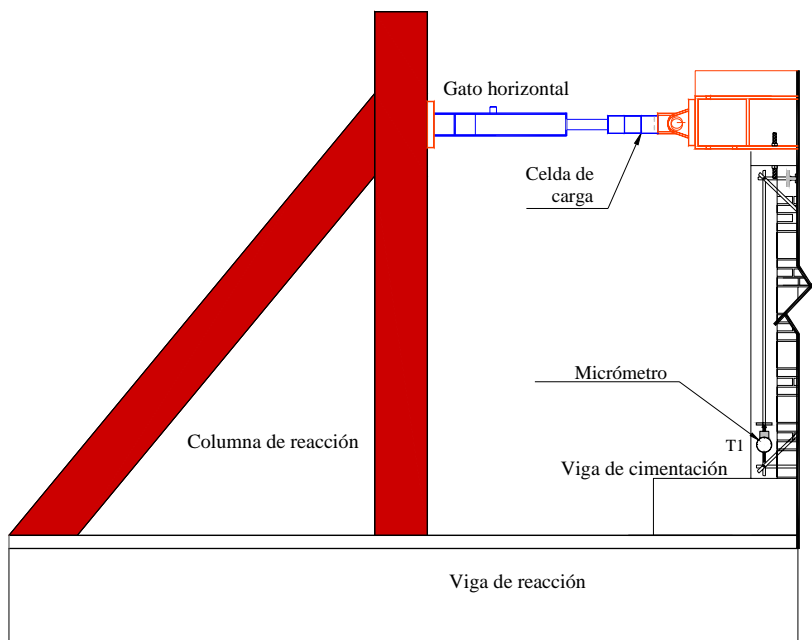


Figura 5.5. Ubicación de la celda de carga para el ensayo del segundo muro

En el caso del primer muro (MCC-1) no se pudo utilizar celda de carga para la adquisición electrónica de los datos, las cargas aplicadas se determinaron a partir de las lecturas del manómetro. Para el muro (MCC-2) se contó ya con la celda de carga colocada en el gato hidráulico horizontal.

5.2 Instrumentación interna

La instrumentación interna consistió de deformímetros eléctricos (strain gages, figura 5.6) adheridos a las barras de refuerzo longitudinal de castillos y dala como se muestra en la figura 5.7.

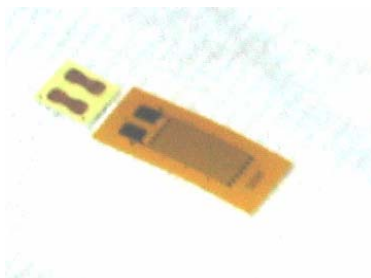
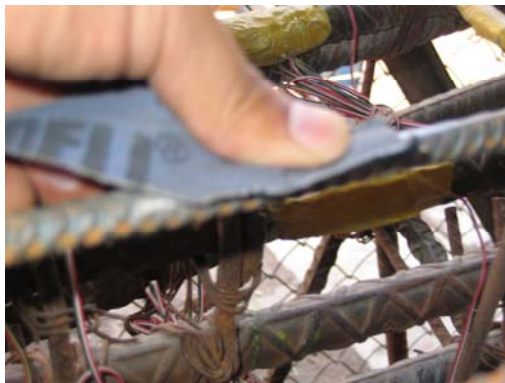


Figura 5.6. Strain gage

La instalación de de los strain gages se hizo de acuerdo al siguiente procedimiento:

- a. Preparación de la superficie
- b. Selección y uso del adhesivo
- c. Alambrado del strain gage
- d. Verificación de la instalación
- e. Protección de la instalación

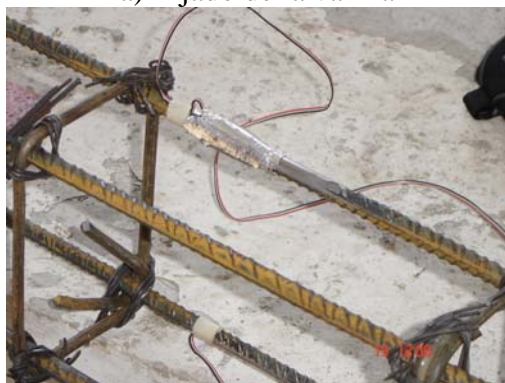
Los deformímetros eléctricos, junto con sus terminales, se adhirieron a las varillas mediante un pegamento especial, se les soldaban cables para su conexión al equipo de captura de datos, se verificaba la instalación, y se cubrían con cinta de vinilo, teflón y aluminio para protegerlos de posibles golpes durante el colado; también se les forró de pegamento 5000 para evitar la penetración de la humedad. En la figura 5.7 se presentan algunos detalles de la colocación de los strain gages.



a) Lijado de la varilla



b) Strain gage, adherido a la varilla



c) Protección contra el impacto del deformímetro



d) Protección contra la humedad del strain gage

Figura 5.7. Deformímetros eléctricos adheridos a las varillas de la dala y castillos

En la figura 5.8 se muestra la ubicación de los 12 deformímetros eléctricos colocados en el refuerzo longitudinal de los elementos confinantes de los muros de prueba. Al igual que los transductores externos, estos instrumentos de medición se conectaron al dispositivo de adquisición de datos TDS (figura 5.9). La colocación de esta instrumentación tuvo como

objetivo la obtención de lecturas de las deformaciones que tendrían las varilla, para obtener los diagramas de histéresis de su comportamiento y la distorsión correspondiente a la fluencia del acero longitudinal.

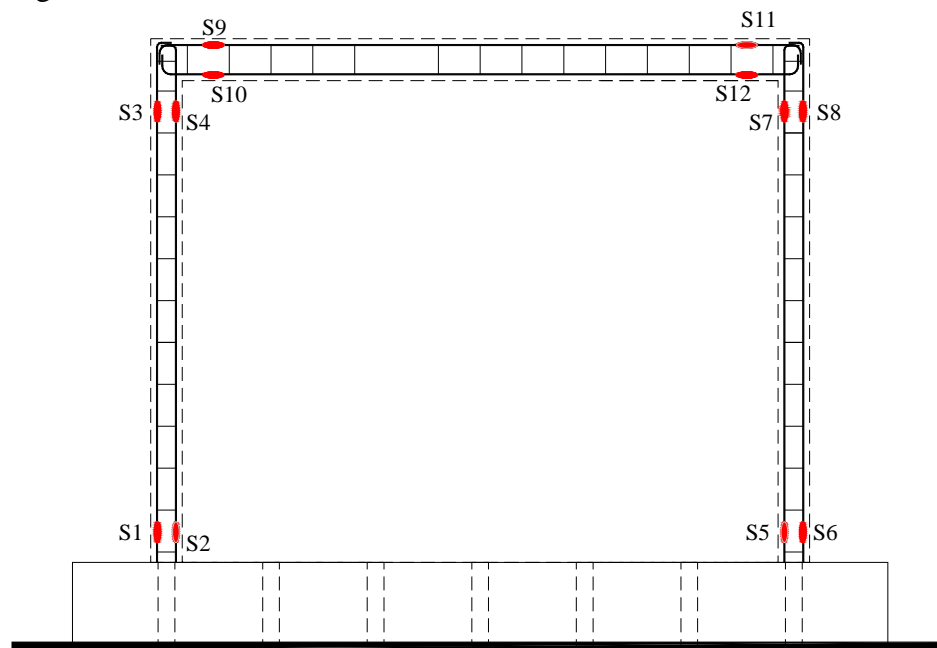


Figura 5.8. Instrumentación interna.

La instrumentación con la que se contó en ambos muros no fue quizás en cantidad igual a la utilizada en el CENAPRED, pero cumplió con el objetivo de determinar las deformaciones que se necesitaban para su análisis. Cabe mencionar que son los dos primeros muros ensayados en la Universidad Autónoma Metropolitana en condiciones semejantes a los estudiados en dicho instituto, y los primeros de mampostería combinada ensayados en México.



Figura 5.9. Equipo de adquisición de datos (TDS)

CAPÍTULO 6

ENSAYE EXPERIMENTAL DE LOS MUROS DE PRUEBA ANTE CARGA LATERAL CÍCLICA

En este capítulo se explica la metodología y se presentan los resultados de los ensayos de los dos muros de mampostería combinada y confinada ante carga lateral cíclica. Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana, la cual cuenta con el equipo necesario y calibrado para la transmisión de carga y la captura de datos.

6.1 Dispositivo de carga

El dispositivo empleado en el ensayo de los especímenes se muestra en las figuras 6.1 y 6.2 y cumple con la función de controlar la reacción de la fuerza lateral aplicada a los muros de prueba y dar una condición cercana al empotramiento a la viga de reacción inferior, evitando un posible deslizamiento y/o volteo del muro en su plano.

Para la aplicación de la carga vertical de compresión, así como la lateral se contó con una viga de acero anclada en la losa (figura 6.2).

Para la aplicación de la carga horizontal se utilizó un gato hidráulico de doble acción de 20 ton, apoyado en la columna vertical del dispositivo de carga, como se muestra en la figura 6.2. El gato se controló con un sistema hidráulico, que aplicó la carga contra una viga de acero sujeta a lo largo de la dala-losa del muro (figura 6.2), con ello se proporcionó una carga horizontal distribuida a lo largo de la parte superior del muro. Asimismo, para ambos muros de prueba se aplicó carga vertical uniformemente repartida mediante el peso propio de la viga de acero y el peso de lingotes de acero que se colocaron sobre esta viga de carga. Las cargas verticales aplicadas fueron 2.2 ton para el primer muro (MCC-1) y 2.0 ton para el segundo muro (MCC-2). En la figura 6.2 se muestra el sistema completo de aplicación de cargas.

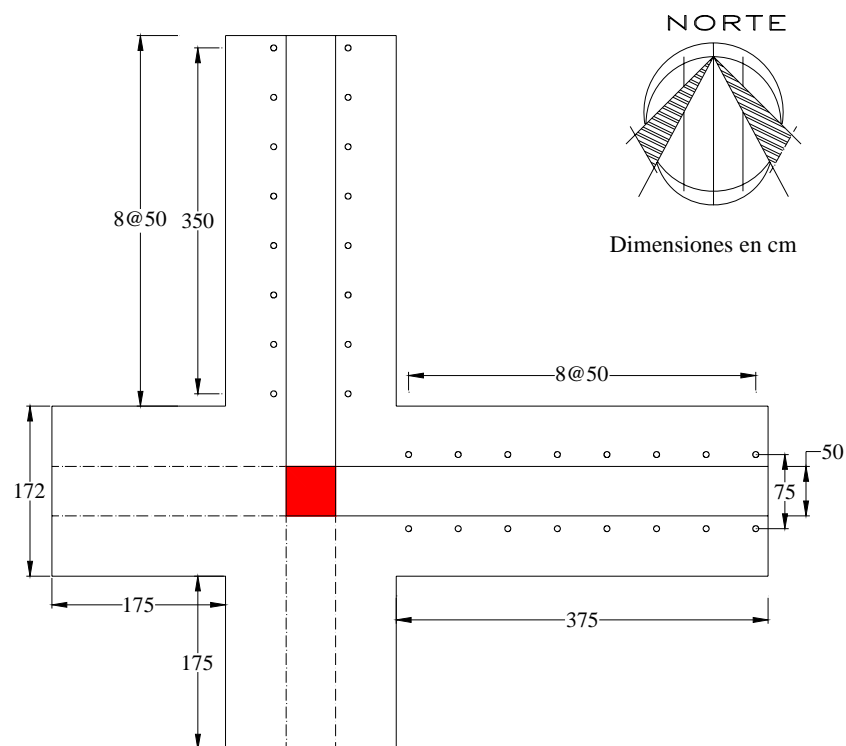


Figura 6.1. Vista en planta del dispositivo de carga

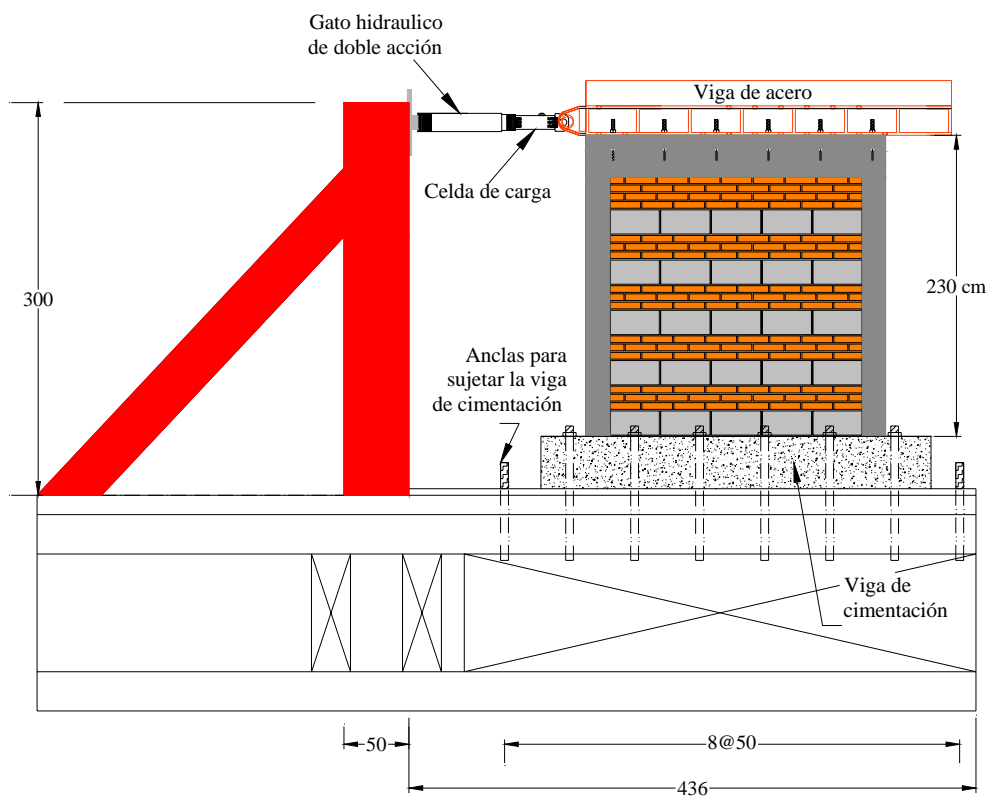


Figura 6.2 Dispositivo de carga, vista en elevación

6.2 Protocolo de ensaye

Los ensayos fueron cíclicos reversibles con una repetición en cada incremento, en congruencia con lo especificado en la secuencia de cargas que recomiendan las NTCM-2004 en su Apéndice Normativo A para la evaluación de sistemas a base de muros de mampostería, donde los primeros ciclos se controlaron por carga hasta el primer agrietamiento, para después controlar por deformación hasta la falla.

En el Apéndice A de las NTCM-2004 se especifica que el primer ciclo corresponde a la cuarta parte de la carga de agrietamiento, el segundo ciclo a la mitad y el tercero al primer agrietamiento inclinado. La carga de agrietamiento que se estimó en el presente estudio fue de 2.4 ton y 4.2 ton, ambas para dos tipos de arreglo de mampostería combinada (Capítulo 4). Para el control de carga de ambos muros se tomó la carga de 4.2 ton

6.2.1. Muro de prueba MCC-1

De acuerdo con la predicción de la carga de agrietamiento, en los dos primeros ciclos se aplicó una carga del 25% de la que se predijo al agrietamiento, los dos siguientes, al 50%, y si sucesivamente hasta alcanzar el primer agrietamiento, el cual, ocurrió a una carga de 5.07 ton, la que excedió un 20 % la estimada. Posteriormente, el ensaye se controló por distorsión, iniciando con 0.002, con incrementos de 0.001, hasta la falla.

En la figura 6.3 se observa que en el control por carga se aplicaron cinco ciclos, cada uno con repetición. Para cada distorsión se aplicaron también ciclos repetidos, hasta alcanzar una distorsión de 0.006, que fue la de falla.

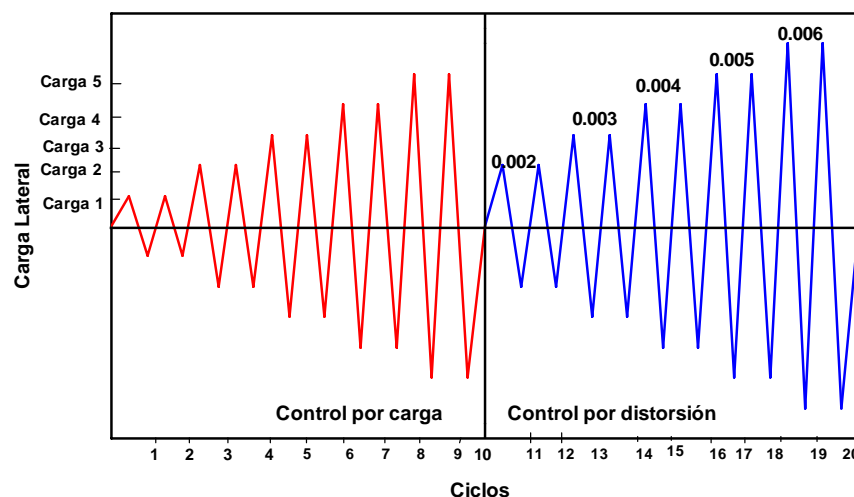


Figura 6.3. Historia de cargas y distorsiones Muro MCC-1

6.2.2. Muro de prueba MCC-2

Para este espécimen se siguió el mismo patrón de carga, hasta llegar a la carga de agrietamiento, la cual fue de 5 ton. Para las distorsiones, el patrón de seguimiento se presenta en la figura 6.4. Como se observa, sólo se alcanzó la distorsión de 0.006 en el empuje de los gatos, ya que el sistema hidráulico, presentó problemas y no se logró llegar mas allá de una distorsión de 0.004, para cuando el gato jala al muro (coloquialmente definido como “jale”).

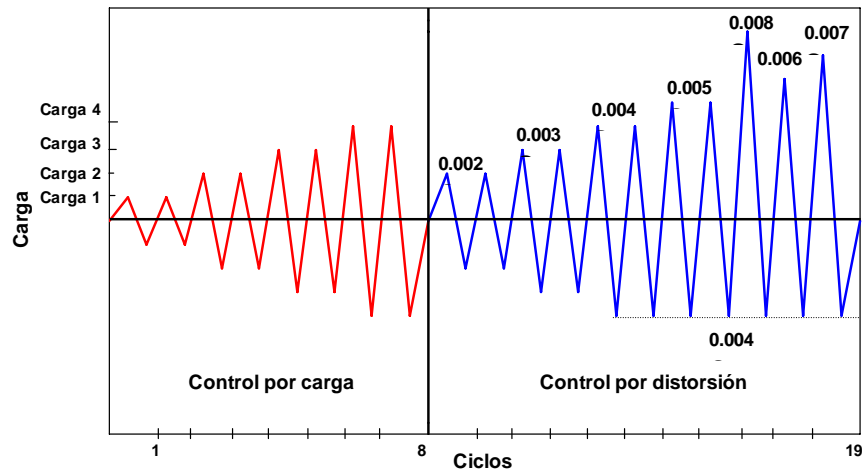


Figura 6.4. Historia de cargas y distorsiones, muro MCC-2

6.3 Historia de los desplazamientos

Otra forma de visualizar el ensayo a deformación controlada para muros de mampostería confinada, es mediante la historia de desplazamientos impuesta que se muestra en la figura 6.5. En el caso presentado en la figura 6.5 a) no hay celda de carga que ayude a la captura electrónica de la carga aplicada, por lo que la carga se determinó “manualmente” a partir de la lectura del manómetro de la bomba (el resto de los datos fueron capturados electrónicamente). En el caso reportado en la figura 6.5 b) ya se contó con una celda de carga, por lo que todos los datos fueron capturados electrónicamente a una frecuencia mayor, de ahí la gran diferencia en el número de datos capturados entre una y otra prueba.

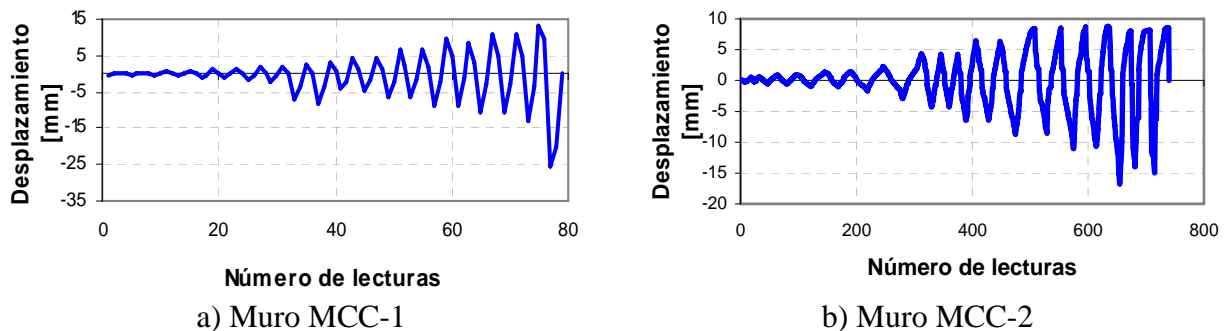


Figura 6.5. Historia de desplazamientos en los muros de prueba

6.4 Resultados Experimentales

6.2.1. Comportamiento histerético

Este comportamiento se resume como la representación gráfica de la historia de carga y su distorsión asociada a lo largo del ensaye de un espécimen. En el comportamiento histerético de la mampostería confinada es muy común observar una marcada degradación de rigidez entre lazos de histéresis sucesivos, como se muestra en la figura 6.6.

El fenómeno por el que los tramos de carga y descarga no se superponen, se denomina histéresis. En estos casos no se restituye todo el trabajo invertido en la deformación del muro y se produce por tanto una disipación de energía (Alcocer, 1997).

El comportamiento histerético del primer muro (figura 6.6a) se presentó de forma relativamente similar hasta alcanzar una distorsión de 0.006. Al aplicar el segundo ciclo de distorsión de 0.006, el muro presentó un deslizamiento importante en su altura media, de donde la grieta diagonal se extendió súbitamente hacia los extremos superior e inferior de los castillos que ya habían sido penetrados en ciclos anteriores, obteniéndose de esta manera el estado último de falla. La penetración más crítica para la estabilidad del muro se presentó en el extremo superior de uno de los castillos (figura 6.7a). Los datos capturados en estas condiciones son los que se presentan en línea punteada en la figura 6.6 a). Por razones obvias, no se logró completar el segundo ciclo a esta deformación.

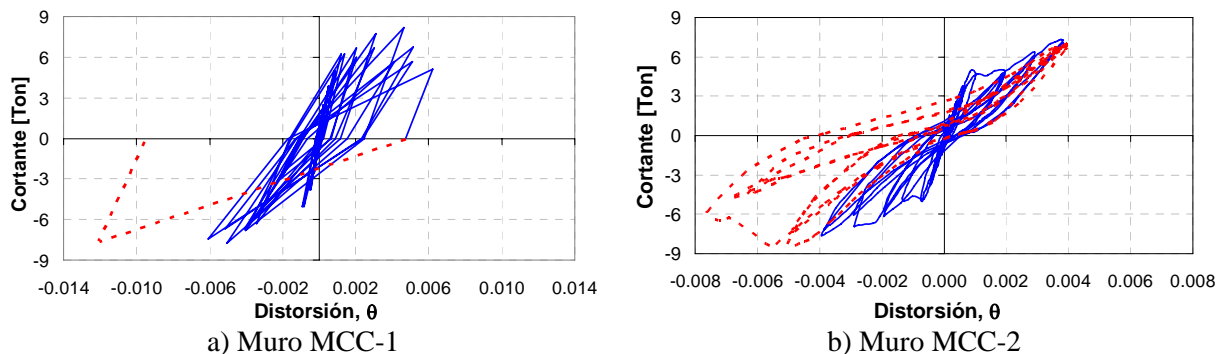


Figura 6.6. Comportamiento histerético total de los dos especímenes

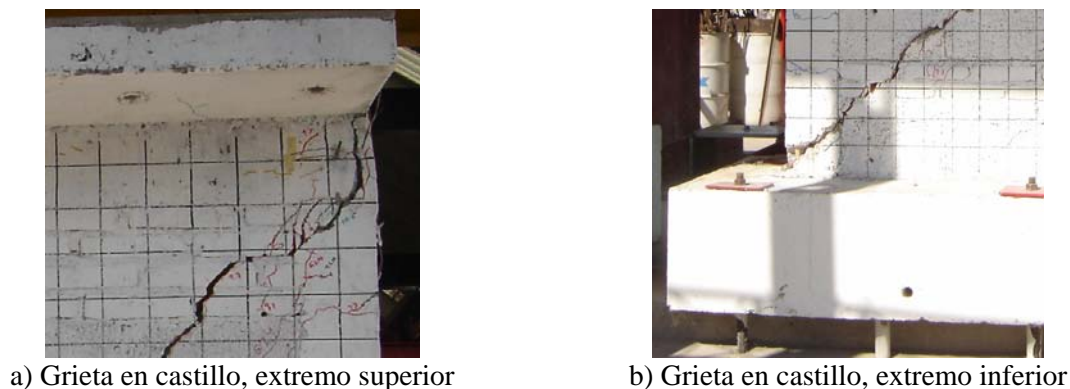
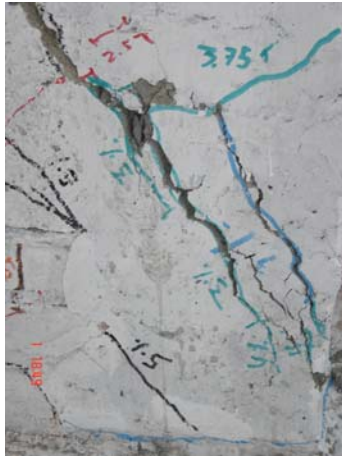
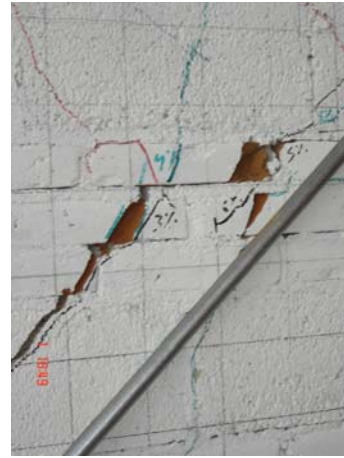


Figura 6.7. Estado último de falla en los castillos del espécimen MCC-1

El segundo muro presentó cierta simetría en los ciclos histeréticos (“empuje” y “jale”) hasta alcanzar una distorsión de 0.004 (figura 6.6b). Al realizar la repetición para la distorsión de 0.005, el sistema no logró desarrollar una distorsión de 0.005 al momento de jalar el espécimen. La prueba se continuó hasta alcanzar la distorsión de 0.008. Estos ciclos asimétricos se muestran con línea punteada en la figura 6.6b.



a) Grieta en castillo, extremo inferior

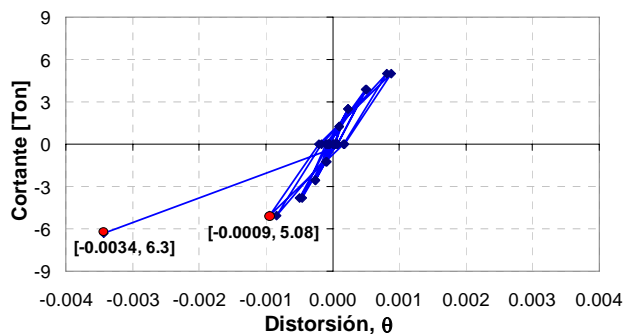


b) Grietas al centro del panel

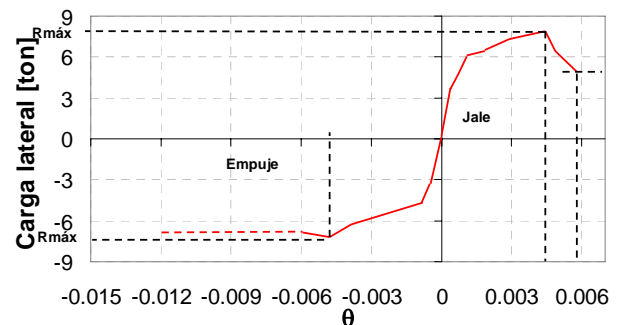
Figura 6.8. Estado último de falla del espécimen MCC-2

6.2.2. Envolvente de la curva carga lateral-distorsión

En el primer muro ensayado, la etapa elástica llegó hasta una distorsión de 0.0009 correspondiente a una carga de 5.0 ton (figura 6.9). A partir del primer gran agrietamiento ocurrido se registró una carga de 6.3 ton y una distorsión de 0.0034; el espesor de esta primera gran grieta fue de 5 mm. En la etapa inelástica, que correspondió al control por distorsión, el espesor de grieta que se comenzó a registrar fue de 1.5 mm en el bloque y 2.5 mm en el tabique, hasta llegar a 22 mm en ambas piezas.



a) Etapa elástica



b) Envolvente carga lateral-distorsión

Figura 6.9. Etapas de comportamiento en el muro MCC-1

En la figura 6.9b se presentan las cargas máximas en ambos cuadrantes, en el caso de empuje, se aprecia el deslizamiento que ocurrió al final del ensaye por la penetración total de grietas en los castillos, el cual inició a una distorsión de 0.006 mm/mm y la lectura final cuando se retiró de inmediato la aplicación de la carga llegó a ser de 0.012 mm/mm, en condiciones de claro colapso, motivo por el cual se dio por terminado el ensaye. Las cargas máximas correspondientes a empuje y jale del espécimen MCC-1 fueron de 7.7 ton ($\theta = 0.005$) y 8.2 ton ($\theta = 0.0046$), respectivamente.

Para el muro MCC-2 (figura 6.10), la etapa elástica llegó hasta una distorsión de 0.0007 mm/mm y una carga de 5.0 ton. El primer gran agrietamiento ocurrió bajo esta carga y distorsión (al momento de jalar el espécimen); el espesor de esta grieta fue de 1.5 mm en el bloque y 2.5 mm en el tabique. A partir de esta etapa el control se continuó por distorsión, hasta llegar a la carga máxima de 8.35 ton con distorsión de 0.006 mm/mm y un ancho de grieta de 15 mm en el tabique y 10 mm en el bloque.

Las cargas máximas correspondientes a empuje y jale del espécimen MCC-2 fueron de 7.3 ton ($\theta = 0.0038$) y 8.4 ton ($\theta = 0.0056$), respectivamente.

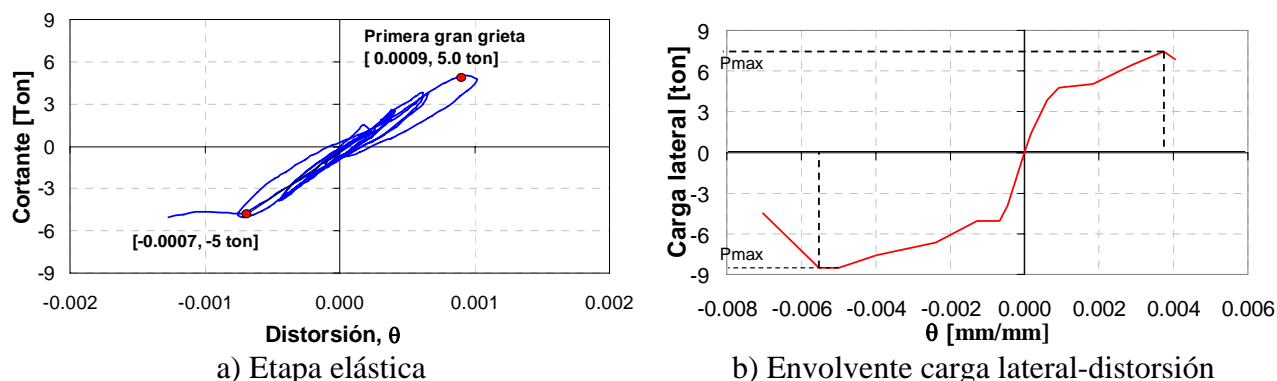


Figura 6.10. Etapas de comportamiento en el muro MCC-2

6.2.3. Degradación de rigidez de ciclo

Un parámetro importante en la evaluación de estructuras existentes (como en el diseño de nuevas estructuras de mampostería) es la degradación de rigidez, debido a que el daño de las mismas está asociado a su capacidad de absorber las cargas laterales. A menudo se toman valores de distorsión permisibles en los códigos que limitan el desplazamiento lateral de las edificaciones para evitar un daño severo en la mampostería. Sin embargo, es necesario realizar un análisis a fondo, para determinar los niveles a los que se le permitiría incurrir a una estructura de mampostería. En este apartado se muestra la degradación de rigidez en función del nivel de distorsión obtenida para los dos muros de mampostería combinada y confinada, ensayados en la UAM.

La rigidez de ciclo se calcula como la pendiente de la secante que une los puntos de máxima distorsión, en sentidos positivo y negativo para un mismo ciclo. En la figura 6.10a se

presenta, la degradación de rigidez para los primeros ciclos y para las repeticiones del muro MCC-1. Se nota que para los segundos ciclos la pérdida de rigidez al inicio es suave, hasta llegar a una distorsión de 0.0009 (etapa elástica), en la que sufre una pérdida de rigidez pronunciada en la siguiente repetición, hasta llegar al 40% de la rigidez inicial. Para el primer ciclo, esta pérdida de rigidez se presentó a una distorsión de 0.0009 (etapa elástica), hasta descender al 30% de la rigidez inicial. A partir de ahí el comportamiento para ambos ciclos fue similar.

En el segundo muro de mampostería combinada y confinada la caída de rigidez de los primeros y segundos ciclos se presentó de forma suave, hasta llegar a una distorsión de 0.0009 (20% de la rigidez inicial), distorsión a la cual se presentó el primer gran agrietamiento (al jalar el espécimen). A partir de esta distorsión la degradación de rigidez fue con una pendiente menos pronunciada. En la figura 6.11b se presenta la gráfica de degradación de rigidez correspondiente a este muro.

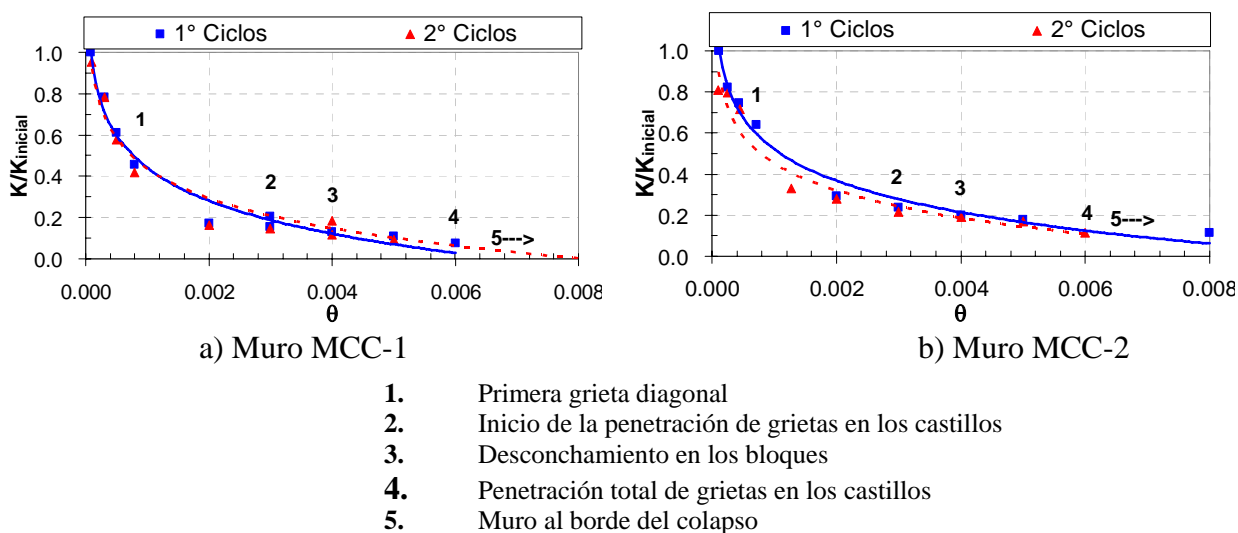


Figura 6.11. Degradación de rigidez

6.2.4. Disipación de energía

En términos generales, la energía se define como la capacidad que tienen los cuerpos para realizar un trabajo. El trabajo que realiza un muro de mampostería para controlar los desplazamientos provocados por fuerzas accidentales se le conoce como la capacidad para disipar energía.

La disipación de energía en una estructura es un fenómeno asociado a la deformación que sufre la estructura. La energía disipada por una estructura se obtiene a partir del área circunscrita por los lazos de histéresis generados a partir del diagrama carga lateral-deformación de un ensayo cuasi-estático.

Para una estructura sujeta ciclos de carga reversibles, se obtiene a través de los lazos de histéresis: la energía disipada por deformación, la energía disipada equivalente y la energía histerética acumulada.

6.4.4.1. Energía de deformación

La energía disipada por deformación de la estructura es un parámetro muy importante, ya que a través de este concepto se determina la energía de deformación elástica recuperable en la estructura, así como la capacidad de energía disipada por deformación de la estructura que no es recuperable y que está ligada al daño estructural de la estructura.

Energía de deformación elástica

La energía elástica se obtuvo a partir del de la envolvente del diagrama de histéresis del cuadrante negativo (semiciclos de empuje). Este parámetro se calculó integrando el área bajo la curva correspondiente al límite elástico de la curva ajustada (figura 6.12) carga lateral-deformación para cada muro de prueba.

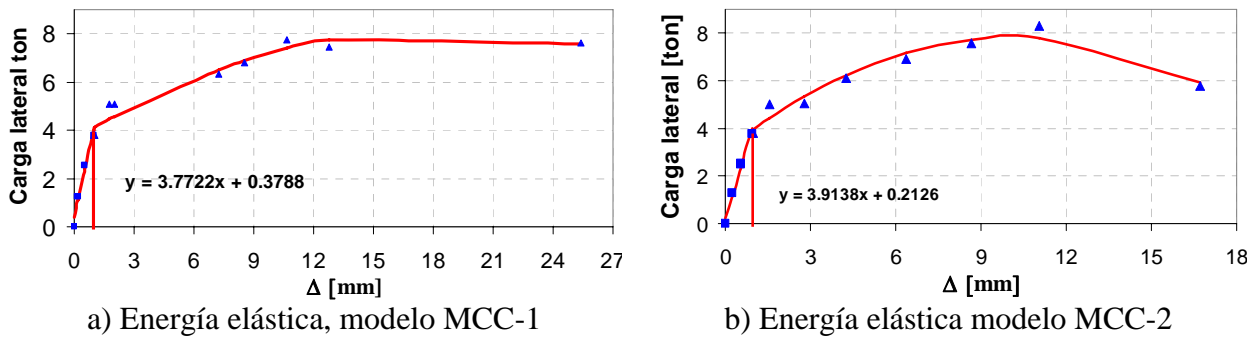


Figura 6.12. Curvas ajustadas en el intervalo elástico de los modelos

Aplicando las ecuaciones 6.1 y 6.2, se obtuvo la energía de deformación elástica correspondiente a los muros MCC-1 y MCC-2, respectivamente.

$$U_r = \int_0^{0.96} 3.7722x + 0.3788 \, dx \quad (6.1)$$

Energía elástica muro MCC-1: $U_r = 2.1 \text{ ton-mm}$

$$U_r = \int_0^{0.96} 3.9138x + 0.2126 \, dx \quad (6.2)$$

Energía elástica muro MCC-2: $U_r = 2.01 \text{ ton-mm}$

Energía de deformación de fractura

Esta cantidad representa el área total dentro del diagrama carga lateral-deformación (figura 6.12), y por consiguiente indica la densidad de energía de deformación del material antes de llegar a la fractura. El cálculo se realizó integrando las ecuaciones ajustadas para los intervalos elástico e inelástico de las curvas carga lateral-deformación.

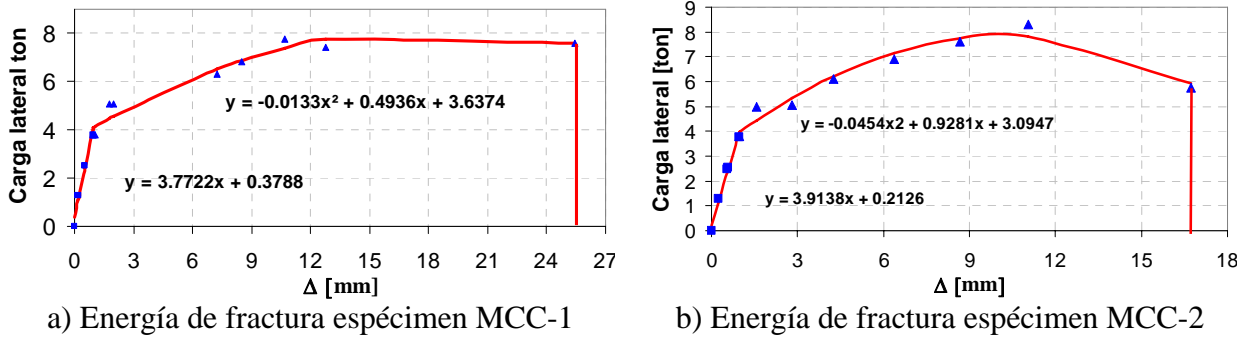


Figura 6.13. Curvas ajustadas en los intervalos elástico e inelástico de los modelos

Aplicando las ecuaciones 6.3 y 6.4, se obtuvo la energía de deformación de fractura correspondiente a los muros MCC-1 y MCC-2, respectivamente.

$$U_t = \int_0^{0.96} 3.7722x + 0.3788 \, dx + \int_{0.96}^{25.42} -0.0133x^2 + 0.4936x + 3.6374 \, dx \quad (6.3)$$

Energía de fractura muro MCC-1: $U_t = 177.5 \text{ ton-mm}$

$$U_t = \int_0^{0.96} 3.9138x + 0.2126 \, dx + \int_{0.96}^{16.72} -0.0454x^2 + 0.9281x + 3.0947 \, dx \quad (6.4)$$

Energía de fractura muro MCC-2: $U_t = 109.4 \text{ ton-mm}$

6.4.4.2. Energía disipada equivalente

La energía disipada equivalente es el cociente de la energía disipada del espécimen sometido a deformaciones laterales cíclicas reversibles entre la energía disipada ideal. Se calcula como el área obtenida por la curva histerética para ese ciclo dividida entre el área circunscrita por los paralelogramos definidos por la rigidez del primer ciclo y la carga máxima del ciclo para el cual se calcula la energía disipada equivalente como se ilustra en la figura 6.14 (NTCM-2004). Para este estudio se representó por medio de la ecuación 6.5.

$$EDE = \frac{A_c}{A_p} \quad (6.5)$$

donde:

EDE Energía disipada equivalente

A_C Área obtenida por la curva histerética para el segundo ciclo completo antes de la falla

A_P Área circunscrita por los paralelogramos definidos por la rigidez del primer ciclo

La energía de ciclo que se tomó para este caso fue la correspondiente a una distorsión de 0.005 para ambos muros. Los resultados se presentan a continuación.

$$EDE = \frac{A_C}{A_P} = \frac{0.0224}{0.1184} = 0.189 \quad \text{Muro MCC-1}$$

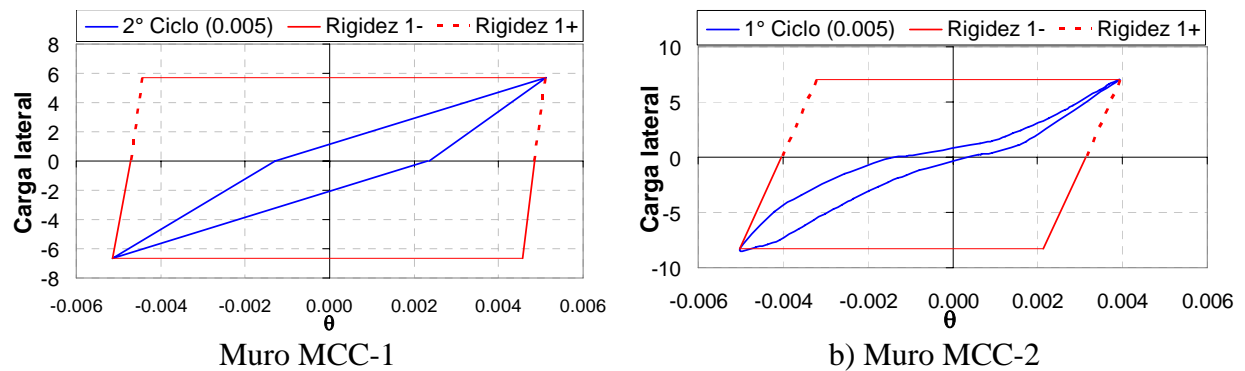


Figura 6.14. Energía disipada equivalente para $\theta = 0.005$

En el modelo MCC-2 la repetición del segundo ciclo de la distorsión de 0.005, sólo se llevo hasta 0.004. Para este caso se realizó un ajuste a la serie de datos obtenida para los primeros ciclos (tendencia semejante a la del muro MMCC-1 como se ve en la figura 6.15) y se extrapoló el valor correspondiente.

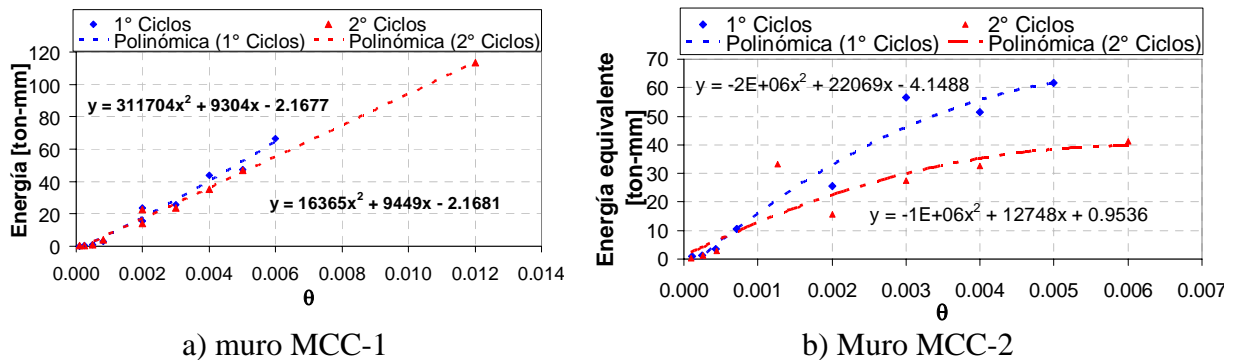


Figura 6.15. Gráficas de curvas ajustadas para energía disipada para cada ciclo

Se obtuvo la energía correspondiente a la distorsión de 0.005 para los primeros ciclos del muro MCC-2 a partir de la curva presentada en la figura 6.15b.

$$EDE = \frac{A_c}{A_p} = \frac{0.026}{0.0802} = 0.314 \quad \text{Muro MCC-2}$$

6.4.4.3. Energía histerética acumulada

Se calcula la capacidad que tiene este sistema estructural de trabajar dentro de un intervalo inelástico de respuesta sin perder su resistencia. Esto se cuantifica mediante la energía de deformación que el sistema es capaz de disipar en ciclos histeréticos consecutivos. La energía histerética acumulada es la que ciclo a ciclo el espécimen va disipando, de esta manera se cuantifica la cantidad de energía disipada durante todo el ensaye (figura 6.16).

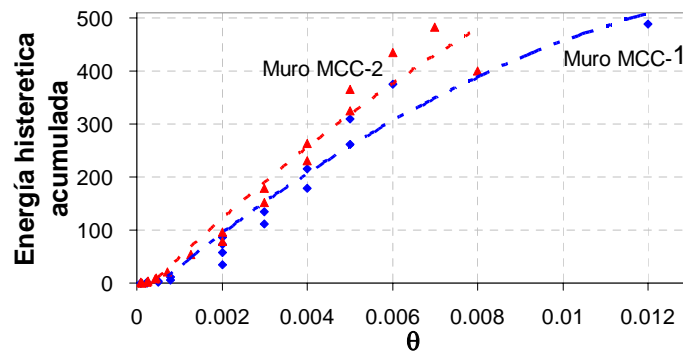


Figura 6.16. Energía histerética acumulada de los primeros y segundos ciclos

La energía histerética acumulada durante el ensaye de ambos especímenes, fue de 490 y 480 ton-mm correspondientes a distorsiones de 0.0012 y 0.007, especímenes MCC-1 y MCC-2 respectivamente.

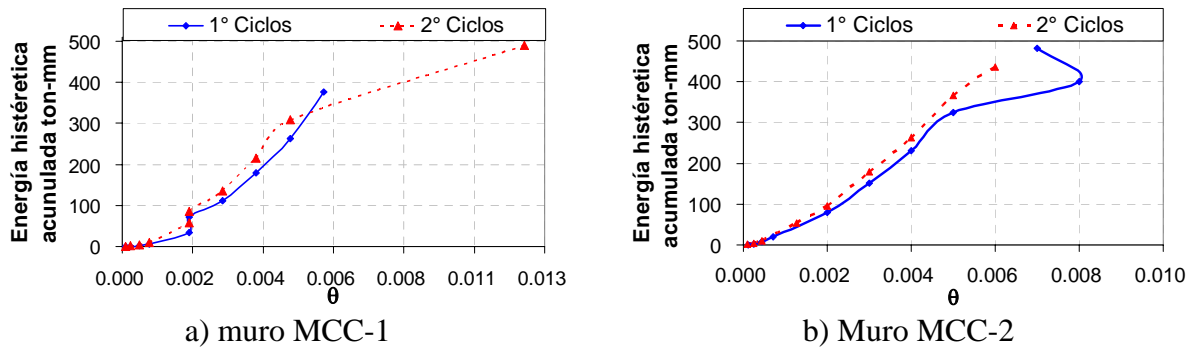


Figura 6.17. Energía histerética acumulada, primeros y segundos ciclos separados

6.2.5. Amortiguamiento viscoso equivalente

En los elementos de mampostería estructural, existen mecanismos que contribuyen a la disipación de la energía, tales como: fricción en conexiones, apertura y cierre de micro grietas,

fricción entre elementos estructurales y no estructurales, etc., lo que dificulta una posible representación matemática para cada mecanismo de disipación de energía.

Una forma de incluir esta disipación de energía en modelos analíticos es mediante el amortiguamiento viscoso equivalente, que es representado por ξ_{eq} (llamado porcentaje de amortiguamiento equivalente), y se calcula como (Chopra, 1996):

$$\xi_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} \quad (6.6)$$

donde:

- ξ_{eq} Porcentaje de amortiguamiento viscoso equivalente
- E_D Energía del ciclo histerético
- E_{S0} Energía de deformación elástica equivalente

En la figura 6.18 se muestran las variables que intervienen en éste parámetro. El coeficiente de amortiguamiento representa la energía equivalente disipada en todo el mecanismo de amortiguamiento. La figura 6.17 presenta el amortiguamiento viscoso equivalente para los primeros (1° ciclos) y segundos ciclos (2° ciclos), para cada uno de los especímenes ensayados. La energía elástica corresponde a los semiciclos negativos (empuje).

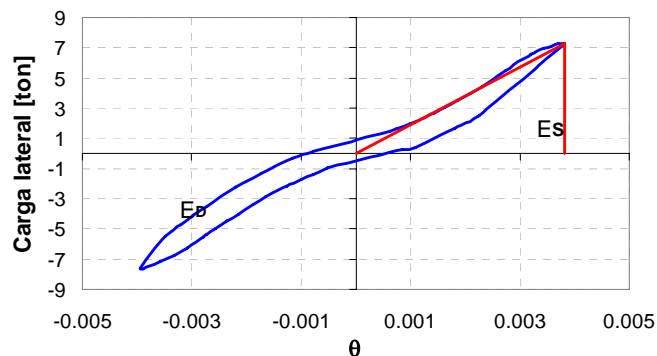


Figura 6.18 Cálculo del amortiguamiento viscoso equivalente

En la figura 6.19a se muestra la tendencia del ξ_{eq} que exhibió el espécimen MCC-1. Se aprecia que el amortiguamiento generado por las repeticiones fue similar al de los primeros ciclos. El mayor incremento de ξ_{eq} para ambos ciclos ocurrió a una distorsión de 0.002, que para este caso fue a una distorsión posterior a la de la primera grieta diagonal. A partir de ahí el ensaye se controló por distorsión. Para las siguientes distorsiones aplicadas, se observa un comportamiento estable de ξ_{eq} , oscilando alrededor del 10%.

La tendencia del ξ_{eq} exhibida por el espécimen MCC-2, se presenta en la figura 6.19b, para este espécimen el promedio de ξ_{eq} estuvo por debajo de la que se presentó en el espécimen MCC-1. Se observa que para este espécimen el porcentaje de amortiguamiento viscoso equivalente osciló alrededor del 5 %.

Cabe señalar que por las limitaciones en la captura de los resultados experimentales en el muro MCC-1, los valores calculados son indicativos, pero su precisión es pobre comparada con la respuesta del espécimen MCC-2, donde existió una mayor y mejor captura de datos experimentales.

Como se observa en la figura 6.19, el coeficiente de amortiguamiento depende de la intensidad y duración de la aplicación de la carga. Se observa al inicio de la prueba altibajos en este parámetro, pero una vez que incursiona en el intervalo inelástico, a partir del primer agrietamiento diagonal, podemos ver en ambos modelos que el ξ_{eq} , comienza a estabilizarse para cada ciclo y sus repeticiones.

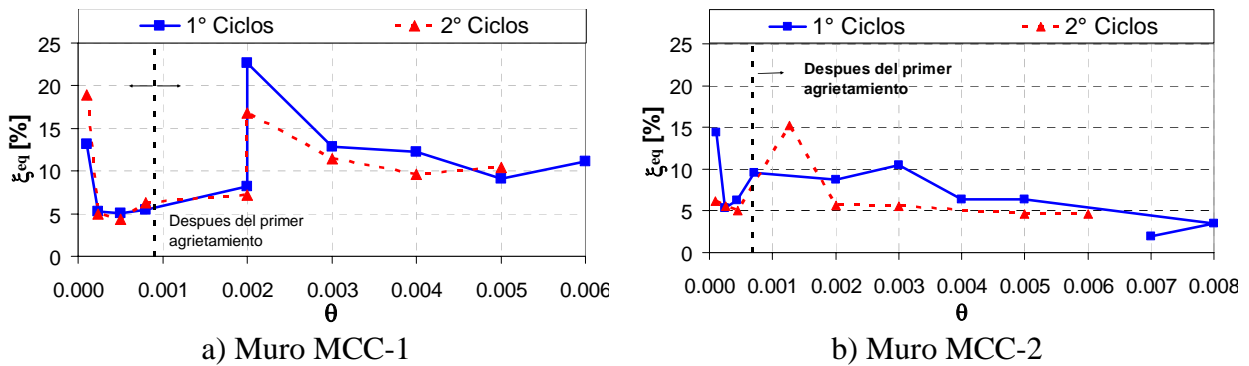


Figura 6.19. Amortiguamiento viscoso equivalente

6.2.6. Índice de daño de Kwok-Ang

Las propiedades estructurales de las construcciones se deterioran cada vez que se les introduce a su intervalo de comportamiento plástico. Una posible consecuencia del deterioro excesivo es la falla estructural a niveles de deformación significativamente menores que la capacidad de deformación última de la estructura (Terán, 2005).

La resistencia lateral de un muro de mampostería está íntimamente relacionada a su capacidad friccional, una vez que las grietas se extienden y se abren más, el muro ha disipado una gran cantidad de energía lo que provocaría un colapso inminente, incluso bajo fuerzas menores actuando fuera de su plano. En este apartado se determina el índice de daño de Kwok-Ang (Kwok y Ang, 1987), que relaciona la respuesta de la estructura (disipación de energía por medio de histéresis) con el nivel esperado de daño (deformación máxima). De acuerdo con el comportamiento de la mampostería, Kwok y Ang establecen que el daño sísmico se puede expresar en función de la energía disipada y el daño causado por una excesiva deformación y lo expresan en términos de un índice de daño.

Este término se le conoce como índice de daño de Kwok-Ang:

$$D = D_u + D_e \quad (6.7)$$

donde:

$$D_u = \frac{u_m}{u_f} \quad (6.8)$$

$$D_e = \varepsilon \frac{\int dE}{q_u u_f} \quad (6.9)$$

donde:

u_m	Deformación de la respuesta máxima
u_f	Deformación a la falla
$\int dE$	Energía histerética acumulada
q_u	Capacidad última a cortante
ε	Constante

El índice de daño calculado para cada espécimen ensayado es una medida de su capacidad para resistir daño, cuando se les sujeta a cargas cíclicas reversibles (Kwok y Ang, 1987). Aunque este índice de daño sísmico es planteado originalmente para mampostería no reforzada, en el presente estudio se analiza para mampostería confinada.

De acuerdo con la ecuación 6.7 se plantea el daño estructural en función de los parámetros de respuesta u_m y $\int dE$ y de los parámetros estructurales u_f , q_u y ε . Debido a falta de ensayos experimentales de la modalidad de mampostería confinada y combinada se determinaron las variables estructurales del muro MCC-1, además pensamos que es representativo, ya que, se llevó casi a su colapso. Obteniéndose los siguientes valores.

$$q_u = 5128.2 \text{ kg (distorsión igual a 0.006)}$$

$$u_u = 12.63 \text{ mm (correspondiente a una distorsión de 0.006)}$$

Considerando que el desplazamiento de falla (u_f) es múltiplo del desplazamiento último (u_u), se calculó cómo lo deducen Kwok y Ang:

$$u_f = \alpha u_u$$

donde:

$$\alpha = 1.47$$

$$\varepsilon = 0.075 \text{ (valor escogido a partir del estudio de Kwok y Ang)}$$

$$\text{Por lo tanto, } u_f = 18.6 \text{ mm}$$

De acuerdo a Kwok y Ang, el intervalo de valores para este índice de daño se presenta en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Valores propuestos para el índice de daño

	No existe daño	Daño reparable	Daño severo	Colapso inminente
D	0	0 a 0.25	0.25 a 1.0	≥ 1.0

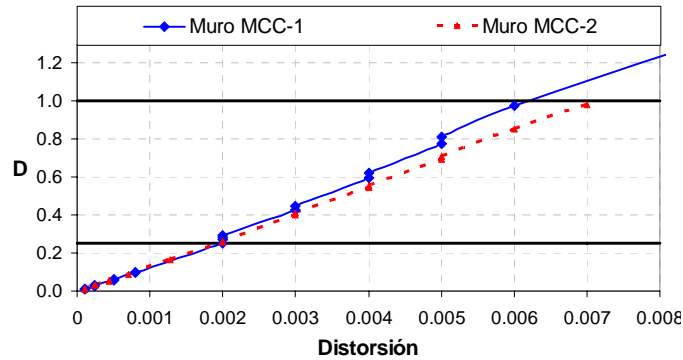


Figura 6.20. Índice de Kwok y Ang

De acuerdo a la tabla 6.1 y los resultados obtenidos para los dos especímenes, se observa que para una distorsión de 0.002 el daño de la estructura es reparable, coincidiendo con otros ensayos previos en el CENAPRED, que el mayor daño de una estructura se da para distorsiones de 0.002 a 0.006, puntualizando el hecho que si un muro incursiona en distorsiones mayores a 0.006 el daño es irreparable y con tendencia irreversible de colapso.

6.2.7. Agrietamiento

El agrietamiento es el primer síntoma de daño estructural en las construcciones, generado por flexión, cargas axiales y cortantes. Las grietas debidas a cortante son típicas en muros de mampostería confinada. Aunque los muros estructurales bien configurados han tenido un buen desempeño, durante sismos recientes, surge una pregunta, ¿hasta qué grado de daño es posible llevar una estructura? Este daño está asociado directamente con el agrietamiento, ya que a medida que éste va aumentando, su capacidad resistente disminuye considerablemente. A continuación se presenta el grado de agrietamiento que presentaron los especímenes al terminar el ensayo (figura 6.21).

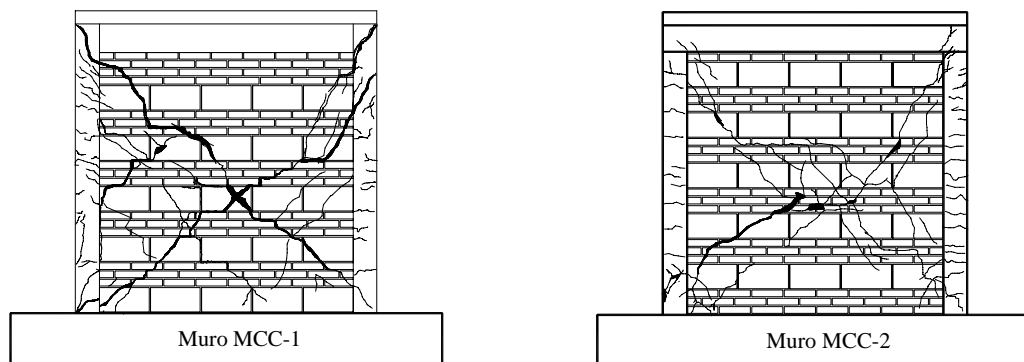


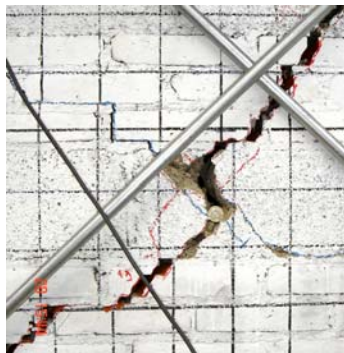
Figura. 6.21. Patrón de agrietamiento final de los especímenes ensayados

Los primeros agrietamientos inclinados se presentaron en una distorsión de 0.0009 y 0.0007 correspondientes a cargas de 5.08 ton y 5.0 ton para el espécimen MCC-1 y MCC-2 respectivamente. El comportamiento seguido a la primera grieta fue completamente inelástico,

ya que a cada incremento, la tendencia de la curva de histéresis era más suave. También era común observar para los dos modelos que las grietas que ya se habían extendido hacia las esquinas superiores e inferiores de la mampostería, hasta penetrar por completo en los castillos, los cuales en ciclos anteriores ya habían presentado grietas por flexión.

Las grietas que se presentaron en primera instancia fueron las correspondientes a la diagonal a tensión. Para el espécimen MCC-1 fueron en el momento de empujar el muro (dirección O-E) a una carga de 5.08 ton, el ancho de esta grieta fue de 5 mm en ambas piezas de mampostería. En el muro MCC-2 la grieta que se presentó fue al jalar el muro (dirección E-O), con una carga de 5.0 ton con grietas de 2 mm y 1.5 mm en el tabique y bloque, respectivamente.

Después de presentarse la primera grieta diagonal, en los ciclos sucesivos de carga y distorsión hubo apretura y cierre de grietas, hasta llegar a la etapa final de la prueba en los dos muros. En el modelo MCC-1 se presentaron grietas de 22 mm en el tabique y bloque, también se generó desconchamiento de 35 mm en el bloque (figura 6.22a). En el modelo MCC-1 se reportaron grietas finales de 1.7 mm y 1.1 mm en tabique y bloque respectivamente, además de desconchamientos en el tabique (figura 2.22b).



a) Grieta final en el muro MCC-1
(moneda de \$10 colocada en la grieta)



b) Grieta final en el muro MCC-2
(moneda de \$ 2 colocada en la grieta)

Figura 6.22. Ancho de grietas al final de la prueba

6.5. Criterios de aceptación de acuerdo a las NTCM-2004

Las NTCM-2004, en su Apéndice A, establecen criterios de aceptación los cuales se deben cumplir para que se considere que el desempeño del espécimen es satisfactorio. Para los muros estudiados en el presente trabajo se verificaron los criterios en el cuadrante negativo, correspondiente al jale del espécimen.

Criterio A.9.1 (NTCM-2004)

De acuerdo con este criterio, la resistencia de los muros, R_{max} , deberá ser igual o mayor a la calculada, R , para una distorsión menor o igual que 0.006 para piezas macizas. En la tabla 6.2

se presentan las comparaciones de los resultados para este criterio. En las figuras 6.12 y 6.13 se muestran las envolventes para ambos muros.

Tabla 6.2. Comparación de resistencias, calculada versus experimental

Muro	R kg	R_{\max} semiciclo negativo kg	Aceptación
MCC-1	4215.5	7600.8 ($\theta = 0.0057$)	“OK”
MCC-2	4215.5	8353.6 ($\theta = 0.0050$)	“OK”

Criterio A.9.2 (NTCM-2004)

La resistencia medida experimentalmente, R_{\max} , es menor que λR , donde λ es el factor de sobrerresistencia para las conexiones, para este caso se tomó el mínimo, $\lambda = 1.3$.

Tabla 6.3. Comparación de resistencias, calculada con sobrerresistencia versus experimental

Muro	λR kg	R_{\max} semiciclo negativo kg	Aceptación
MCC-1	5480.2	7600.8 ($\theta = 0.0057$)	“OK”
MCC-2	5480.2	8353.6 ($\theta = 0.0050$)	“OK”

Criterio A.9.3 (NTCM-2004)

Las características del segundo ciclo a una distorsión de 0.006 deben satisfacer:

- La carga máxima sea al menos igual a $0.8 R_{\max}$ en el mismo sentido de la carga
- La energía disipada equivalente no sea menor que 0.15
- La rigidez de ciclo para distorsiones de 0.006 no sea menor de 0.1 veces la rigidez de ciclo calculada a partir del primer ciclo aplicado en el experimento

Se presentan los tres criterios: a, b y c, del apartado A.9.3 de las NTCM-2004, para su aceptación. Se hace hincapié que para este muro a una distorsión de 0.006, al realizar el primer ciclo de repetición, se presentó un gran deslizamiento provocando una distorsión de 0.012 ($\Delta=2.54\text{cm}$) y, por consiguiente, hasta ahí llegó la prueba. En el segundo muro MCC-2 se presentaron problemas en la bomba hidráulica, al realizar los semiciclos de vuelta para una distorsión de 0.005, por lo que tampoco se completaron los ciclos correspondientes a 0.006.

Para el primer muro (MCC-1), se hacen comparaciones para el 2° semiciclo de repetición, en el segundo muro (MCC-2) se interpoló para una distorsión de 0.006, de acuerdo a la curva ajustada, presentada en la figura 6.13b.

a) La carga para el 2° Ciclo $\geq 0.8 R_{\max}$

Tabla 6.4. Comparación de resistencias, 2° ciclo versus $0.8 R_{\max}$

Muro	R_{\max} kg	$0.8 R_{\max}$ positivo Kg		Carga 2° ciclo Kg	Aceptación
MCC-1	7759.2 ¹	6207.3	<	7600.8	“ OK “
MCC-2	8353.6 ¹	6682.9	<	7435.1	“ OK “

¹Cuadrante negativo (empuje)

¹Cuadrante negativo (empuje)

b) La energía disipada equivalente no sea menor que 0.15, ésta se calculará con la ecuación 6.5, expresada también de la siguiente manera:

$$EDE = \frac{\text{Área bajo la curva}}{\text{Área del rectángulo}} \geq 0.15 \quad (6.10)$$

Para este inciso, para obtener la energía correspondiente a la distorsión de 0.006 del segundo ciclo, se interpoló de acuerdo a la ecuación ajustada a la curva para los segundos ciclos figura (6.15a). Asimismo, para el segundo muro se extrapoló para una distorsión de 0.006 con la curva ajustada a los segundos ciclos de energía disipada figura 6.15b.

Tabla 6.5. Energía disipada equivalente, correspondiente al 2° ciclo ($\theta=0.006$)

Muro	A_C (0.006) Ton-mm	A_p Ton-mm	EDE			Aceptación
MCC-1	55.11	237.04	0.233	>	0.15	“ OK “
MCC-2	56.27	176.3	0.319	>	0.15	“ OK “

c) La rigidez de ciclo para la distorsión de 0.006 no será menor de 0.1 veces la rigidez de ciclo calculada a partir del primer ciclo aplicado en el experimento

Para este criterio, se hizo uso de la graficas presentadas en el apartado 6.4.3 de este capítulo. Los resultados se presentan de manera tabular en la tabla 6.6.

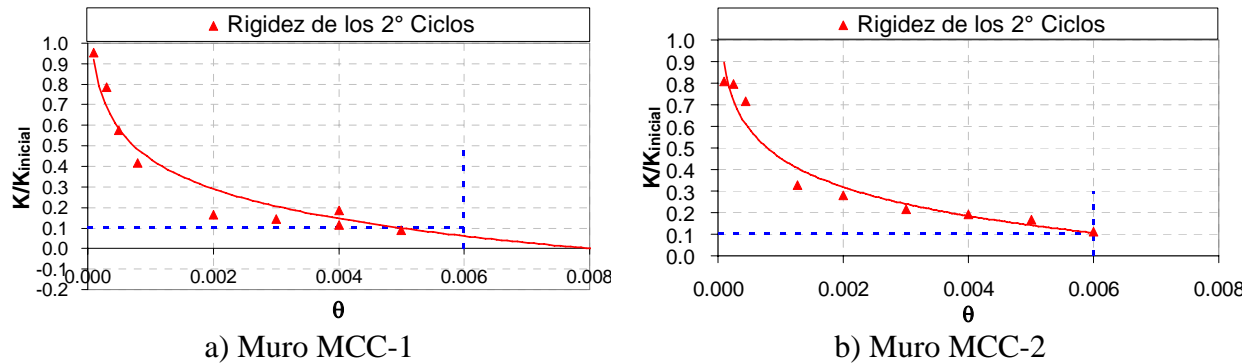


Figura 6.23. Degradación de rigidez para los segundos ciclos

Tabla 6.6. Energía disipada equivalente, correspondiente al 2° ciclo ($\theta=0.006$)

Muro	$K_{inicial}/K_{inicial}$	$K/K_{inicial}$ ($\theta=0.006$)	Aceptación
MCC-1	1	0.08	“ No cumple “
MCC-2	1	0.11	“ OK “

6.6. Propuesta de distorsión de diseño para la mampostería combinada y confinada

De acuerdo con las NTCM-2004, la distorsión permisible para muros de mampostería confinada es de:

- 0.0025 en muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas (utilizando un tipo de pieza en su construcción).
- 0.0035 en muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas con refuerzo horizontal o mallas.

El grado de daño en la mampostería está asociado al deterioro del muro debido al agrietamiento que se presenta cada vez que se le somete a ciclos de carga. El daño en una estructura se va acumulando en cada evento sísmico sucesivo y la capacidad del sistema disminuye seriamente. Las decisiones concernientes al nivel de daño en una estructura de mampostería que es aconsejable aceptar se manejan mediante distorsiones permisibles de entrepiso. Esta distorsión está asociada a su vez al agrietamiento que se va presentando en cada incursión de carga.

Ruiz García propuso en 1995 una tabla que relaciona el grado de daño en la mampostería confinada sometida a cargas cíclicas reversibles y que se reproduce en la tabla 6.7 (Ruiz, Sánchez y Miranda, 1999) . Él plantea lo que se observó experimentalmente, con el nivel de deterioro de sus propiedades estructurales.

Tabla 6.7. Grado de daño y deterioro de las propiedades estructurales en muros de mampostería confinada, según propuso Ruiz García en 1995, (Ruiz, Sánchez y Miranda, 1999)

Estado de daño observado	Distorsión	R/R_{inicial}	$V/V_{\text{máx.}}$	Grado de daño
Fisuras horizontales por flexión. Fisuras verticales por flexión cercanas al paño de los castillos	0.0004	0.80	0.50	Ligero
Primer agrietamiento de la mampostería por tensión diagonal	0.0013	0.35	0.85	Moderado
Inicio de la penetración del fisuramiento inclinado en los extremos de los castillos	0.0020	0.27	0.90	Fuerte
Agrietamiento en forma de “X” en todos los paneles de mampostería	0.0023	0.24	0.98	Fuerte
Aplastamiento del concreto, agrietamiento horizontal distribuido en la altura de los castillos	0.0032	0.18	1.0	Fuerte
Concentración de grietas diagonales en los extremos de los castillos. Desconchamiento del recubrimiento concreto	0.0042	0.13	0.99	Grave
Concentración del daño en los extremos inferiores de los castillos, plegamiento del refuerzo longitudinal (deformación en “S”)	0.0050	0.10	0.80	Grave (no se clasifica)

En este estudio se plantea un valor de distorsión aceptable, de acuerdo al desempeño observado los muros de mampostería confinada y combinada (utilizando dos tipos de pieza en su construcción), sometidos a cargas laterales reversibles del tipo sísmico.

Se propone que la distorsión que puede permitirse debe ser: (a) aquélla previa a donde se presenta desconchamiento en la mampostería, (b) donde se presenta la resistencia máxima y, (c) donde se tiene una rigidez efectiva de por lo menos el 20% de la rigidez inicial.

Se toman estos tres criterios para la decisión de dicho parámetro.

a) Observación del deterioro mediante las fotografías tomadas a los especímenes



Muro MCC-1, $\theta = 0.0009$



Muro MCC-2, $\theta = 0.00072$

Figura 6.24. Primera grieta diagonal, por tensión diagonal



Muro MCC-1, $\theta = 0.0013$

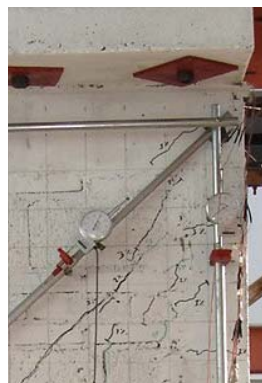


Muro MCC-2, $\theta = 0.0011$

Figura 6.25. Segunda grieta diagonal por cortante, formando una “X en el panel”
Penetración de grietas en los castillos

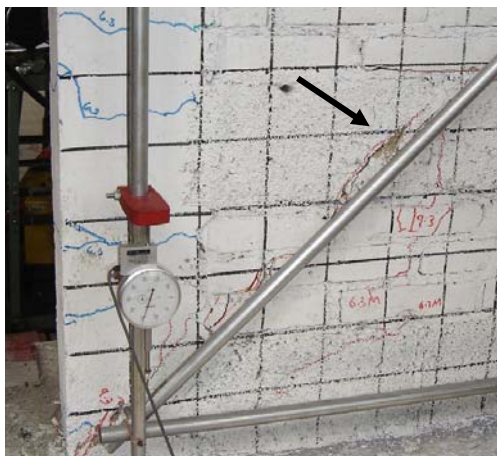


Muro MCC-2, $\theta = 0.003$

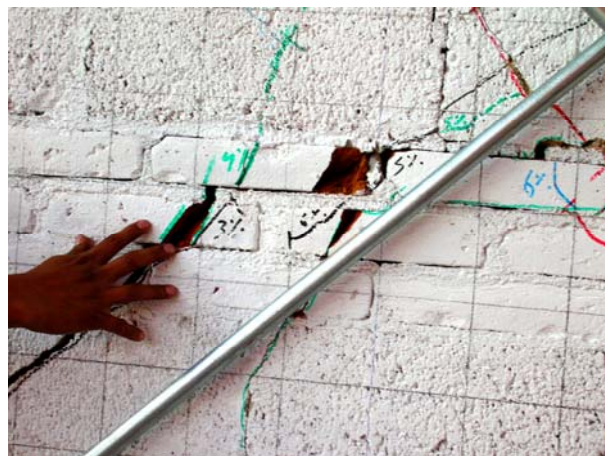


Muro MCC-2, $\theta = 0.003$

Figura 6.26. Inicio de la penetración de grietas en los castillos



Muro MCC-1, $\theta = 0.004$



Muro MCC-2, $\theta = 0.004$

Figura 6.27. Inicio del desconchamiento en las piezas de mampostería

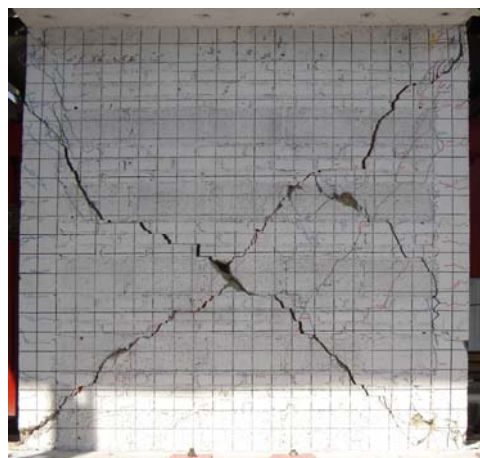
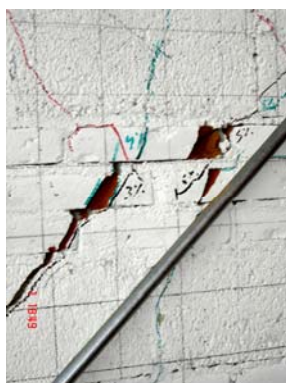


Figura 6.28. Estado final muro MCC-1, $\theta = 0.006$



a) Penetración total de grietas en castillos



b) Daño al centro del muro



c) Penetración total de grietas en castillos

Figura 6.29. Estado final muro MCC-2, $\theta = 0.006$

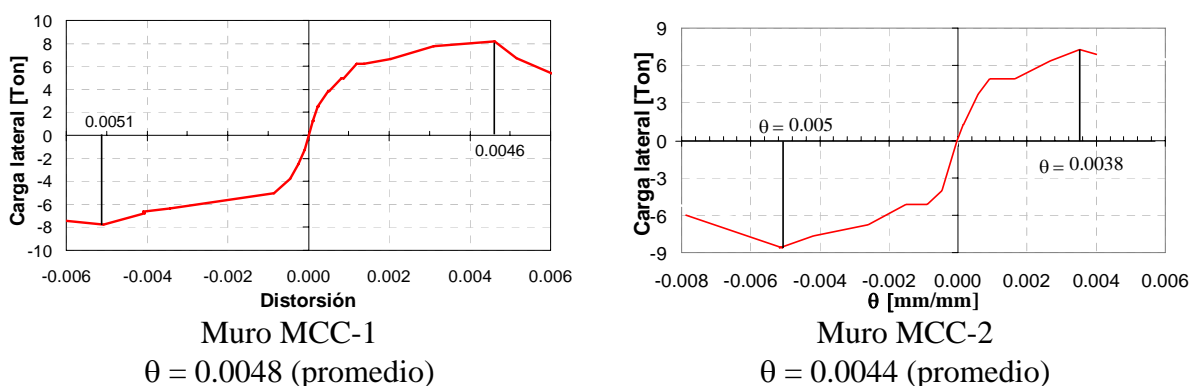
b) *Distorsión asociada a la carga máxima*

Figura 6.30. Distorsiones asociadas a la carga máxima

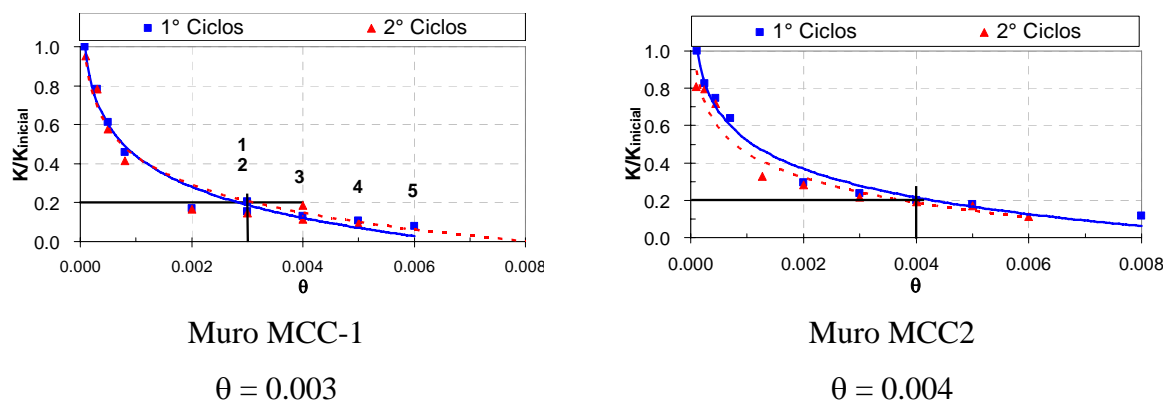
c) *Distorsión correspondiente al 20% de la rigidez inicial*

Figura 6.31. Distorsiones asociadas al 20% de la rigidez inicial

Tabla 6.8. Distorsiones de los muros de mampostería combinada

Criterio	Distorsión Muro MCC-1	Distorsión Muro MCC-2
a)	0.003 ¹	0.003 ¹
b)	0.0048	0.0044
c)	0.003	0.004

¹Distorsión previa al desconchamiento

Por lo tanto, con base en estos parámetros que se sintetizan en la tabla 6.8, y empleado los valores promedio de ambas pruebas, se obtiene que un nivel de daño aceptable en este tipo de mampostería confinada, está asociado a una distorsión de 0.003, rigiendo el criterio a), que de acuerdo con la figura 6.27., este correspondería físicamente a la distorsión (0.003) previa al

inicio del desconchamiento en la mampostería, que además se considera que la estructura es reparable, ya que a ese nivel de daño aún las grietas no han penetrado en su totalidad en las esquinas de los castillos, y el desconchamiento aún no ha iniciado.

6.7. Propuesta de ajuste al índice de Kwok-Ang para esta modalidad de mampostería

En el apartado 6.4.6 se determinó mediante el índice de daño de Kwok y Ang la distorsión que la mampostería combinada y confinada sufriría un daño reparable (distorsión de 0.002 aprox.). Por otro lado, en el apartado 6.6 se analizaron tres criterios para determinar la distorsión a la que los muros de mampostería combinada sufriría un deterioro también reparable. Esta distorsión es de 0.003.

En este estudio, con la salvedad de contar sólo con dos especímenes de este tipo de mampostería, se propone un ajuste al índice de Kwok y Ang para relacionar la respuesta de la estructura con el nivel de daño esperado.

Como se observa en la figura 6.32, la distorsión propuesta en este estudio corresponde aproximadamente a un índice de daño de 0.4, por lo que se determina que el intervalo de daño reparable será de 0 a 0.4 y de 0.4 a 1 tendrá un daño irreparable, y a partir de 1.0 en adelante la estructura fallara.

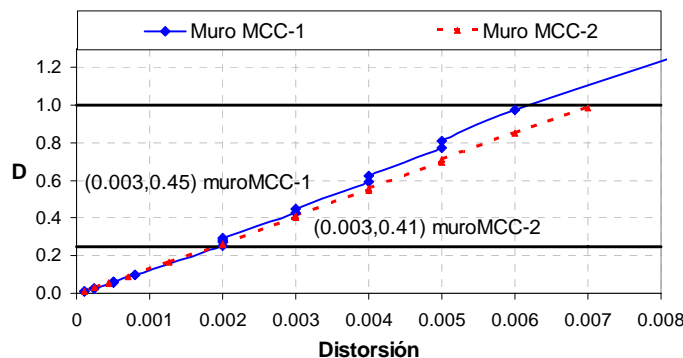


Figura 6.32. Índice de Kwok y Ang

Kwok y Ang (1987), basándose en más de 25 ensayos de muros de mampostería no reforzada hechos en China, propusieron una constante $\varepsilon = 0.075$ para el cálculo de su índice. El ajuste que se hace también involucra un cambio en esta constante.

Se tiene que el índice de Kwok y Ang está dado por

$$D = \frac{u_m}{u_f} + \varepsilon \frac{\int dE}{q_u u_f} \quad (6.11)$$

despejando la variable de interés nos queda:

$$\varepsilon = \left(D - \frac{u_{m(0.003)}}{u_f} \right) \frac{q_u u_f}{\int_0^{0.003} dE} \quad (6.12)$$

donde:

$$u_f = 18.57 \text{ mm}$$

$$q_u = 5.128 \text{ ton}$$

$$\int_0^{0.003} dE = 157.4 \text{ ton-mm (el promedio de los dos muros)}$$

$$u_m = 6.32 \text{ (promedio de ambos muros)}$$

sustituyendo los valores nos queda:

El valor del índice de Kwok y Ang propuesto para daño reparable ($D=0.4$) es aproximadamente el observado para la distorsión de diseño propuesta de 0.003. Se sustituye en esta ecuación, así como el resto de las variables correspondientes a la distorsión de 0.003, quedando:

$$\varepsilon = \left(0.4 - \frac{u_{m(0.003)}}{u_f} \right) \frac{q_u u_f}{\int_0^{0.003} dE} ; \quad \varepsilon = 0.046$$

Por último, se vuelve a graficar el índice de Kwok y Ang con este valor de la constante

ε :

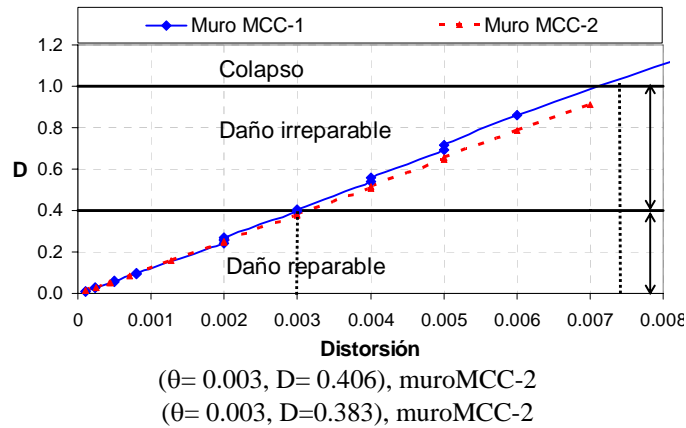


Figura 6.33. Ajuste al índice de Kwok y Ang para mampostería combinada y confinada

6.8. Comparación gruesa con modelos similares del CENAPRED

Se realizó una recopilación de información acerca de especímenes similares ensayados de forma cuasiestática en el CENAPRED, con objeto de hacer una comparación de sus resultados experimentales con los que se obtuvieron en este estudio. La comparación fue principalmente en: historias de histéresis, envolventes, cargas máximas, distorsión, rigidez inicial y patrón de agrietamiento, aunque también se revisaron las propiedades de los materiales utilizados en los diferentes especímenes.

Cabe señalar que aunque en el CENAPRED se ha realizado mucha investigación en cuanto a mampostería confinada, sólo se ensayó en la década de los años 90 un muro de geometría y condiciones generales semejantes a los aquí reportados. Por ello, para fines de comparación con este estudio, se tomaron los resultados de ese muro, denominado como el modelo M-0-E6 (figura 6.34b), que además ha servido como base de comparaciones con varios muros de mampostería con refuerzo interior (horizontal y vertical) ensayados también en el CENAPRED.

Se presenta un resumen de las propiedades de los materiales para los diversos especímenes de los que se hace la comparación.

Tabla 6.9. Comparación de propiedades mecánicas de las piezas

Especímen	f_m^* Kg/cm ²	v_m^* Kg/cm ²	f_p^* Kg/cm ²		f_j^* Kg/cm ²	E_m	G_m
			Tabiques	Bloques			
MCC-1	20.1 ¹	2.57 ²	61	27	205.7	12261.3 ³	4145.3 ⁴
MCC-2	20.1 ¹	2.57 ²			202.0	12261.3 ³	4145.3 ⁴
M-0-E6	25	3.0	-	-	85	7420	4850

¹ Promedio de la resistencia a compresión de las pilas arreglos uno y dos

² Resistencia a compresión diagonal de los muretes arreglo dos

³ Promedio del módulo de elasticidad de las pilas arreglos uno y dos

⁴ Promedio del módulo de cortante de los muretes arreglos uno y dos

Dimensiones de los especímenes

En cuanto a dimensiones, estas fueron las mismas para los dos especímenes de mampostería combinada y confinada, se muestra en la figura 6.34 la variación de dimensiones entre el modelo ensayado en el CENAPRED y los muros ensayados en la UAM, se nota una pequeña discrepancia en cuanto al largo y ancho. Sin embargo la relación de aspecto es la misma para los tres modelos.

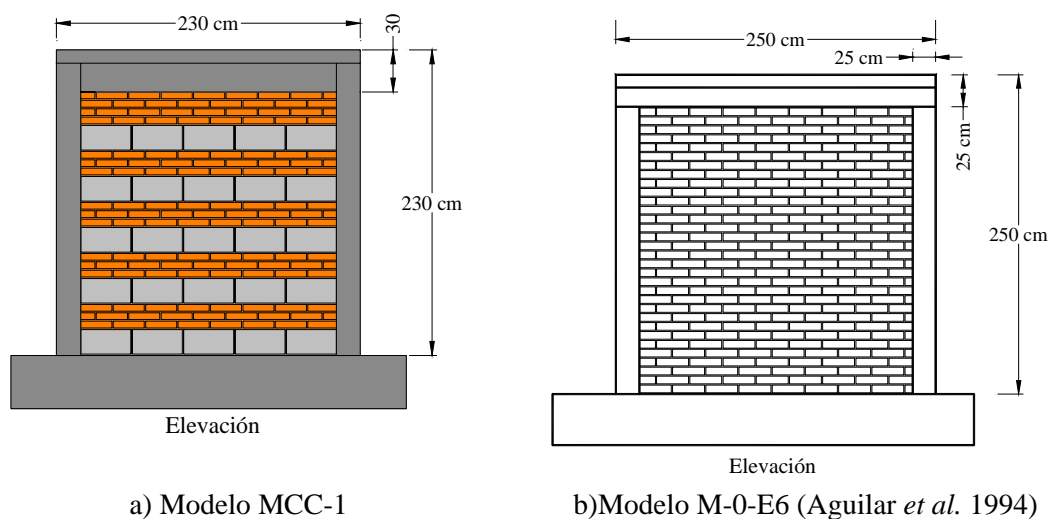


Figura 6.34. Dimensiones de los especímenes

Historia de histéresis

Se presenta en la figura 6.35 la historia de histéresis correspondiente al modelo M-0-E6 y las historias de histéresis de los muros de mampostería combinada y confinada ensayados en este trabajo experimental.

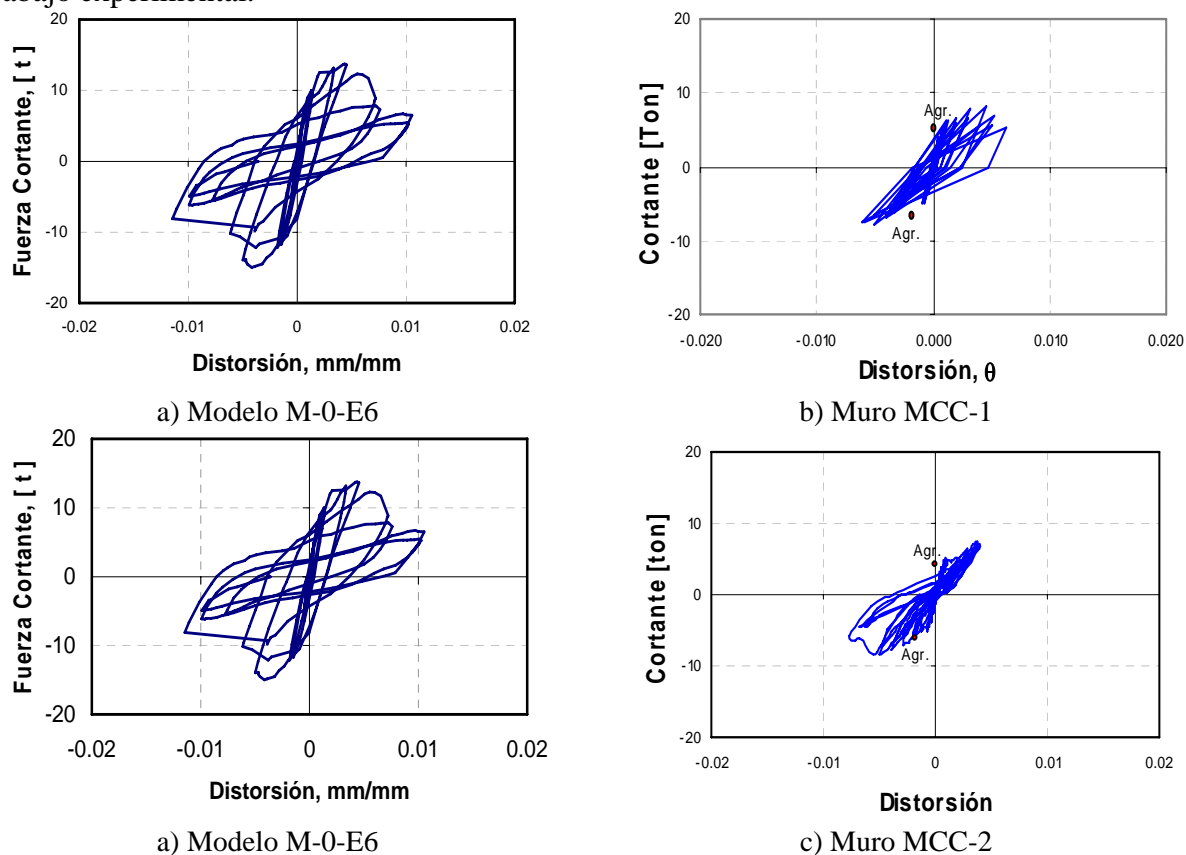


Figura 6.35. Curvas histeréticas de los tres modelos

Los ciclos histeréticos de los modelos ensayados en la UAM son similares a los del muro confinado fabricado con base en ladrillos exclusivamente (figura 6.34b). Al igual que el modelo del CENAPRED, la mampostería combinada mostró su mayor capacidad de carga después al primer agrietamiento inclinado. Las distorsiones que alcanzaron los muros MCC-1 y MCC-2 antes de una notable degradación de resistencia fue cercana 0.006, similar, aunque algo inferior a la observada en el muro ensayado en el CENAPRED.

Agrietamiento

El patrón de agrietamiento que se presenta en la mampostería confinada, se muestra que la tendencia fue similar para los modelos ensayados en la UAM con los del CENAPRED (figura 6.36). En los tres modelos se presentaron grietas inclinadas por tensión diagonal en ambas direcciones, formando una “X” en el panel del muro, donde las grietas principales se dirigieron de los extremos superior e inferior de los castillos. En la zona central de la dala se aprecia un nulo agrietamiento; la zona más dañada es en el panel y en castillos.

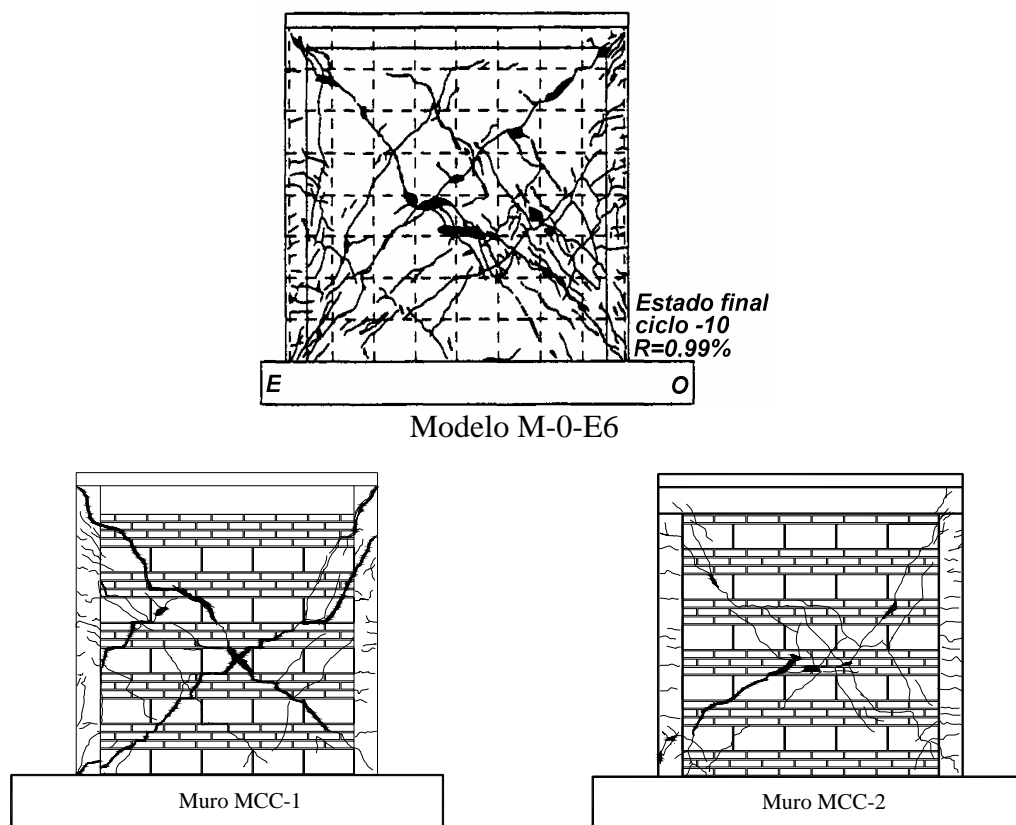


Figura 6.36. Patrones finales de agrietamiento

En la tabla 6.10 se realiza una comparación en cuanto a cargas de agrietamiento, cargas máximas, rigidez inicial y distorsiones últimas.

Tabla 6.10. Comparación gruesa con modelos similares ensayados en el CENAPRED

Muro	Piezas de mampostería utilizadas	Rigidez experimental Ton-mm		V_{agr}^- [ton] (Distorsión)	V_{max}^+ [ton] (Distorsión)	V_{max}^- [ton] (Distorsión)	Distorsión Última
		K^+	K^-				
MCC-1	Bloques y tabiques	5.98	6.28	5.0 (0.0009)	8.17 (0.0046)	7.75 (0.005)	0.006
MCC-2	Bloques y tabiques	3.53	4.37	5.0 (0.0007)	7.3 (0.0037)	8.4 (0.005)	0.008
M-0-E6 ¹	Tabiques	4.81	424	9.65 (0.00100)	13.65 (0.00455)	15 (0.00415)	0.01

¹M-0-E6: modelo de control, estudio analítico de estructuras de mampostería confinada (2001)

En esta comparación se observa que tanto la mampostería combinada y confinada con la del modelo M-0-E6, tienen valores similares en cuanto a distorsiones correspondientes a cortante de agrietamiento, cortante máximo en ambos cuadrantes, discrepando en el cortante último, el cual es notablemente menor. Curiosamente en cuanto a rigidez la mampostería combinada tuvo mayor rigidez que la del modelo del CENAPRED, particularmente la que exhibió el muro MCC-1.

6.9. Normalización de resultados

Como se pudo ver en el apartado anterior, en los muros de mampostería confinada y combinada ensayados en la UAM se obtuvieron resistencias a cortante inferiores a las obtenidas en los muros tradicionales de mampostería confinada construidos con ladrillo rojo recocido ensayados en el CENAPRED. En este apartado se hace una comparación de la carga de agrietamiento que exhibiría un muro de mampostería combinada y confinada con las dimensiones y carga vertical aplicada en el modelo M-E-06 ensayado en el CENAPRED. Debido a las variaciones en la geometría y en la carga axial aplicada en los especímenes de la UAM y el CENAPRED, se hace la comparación de los modelos por medio de una normalización aplicada a los especímenes MCC-1, MCC-2. Para hacer la comparación se procede a usar la primera parte de la ecuación 5.7 de las NTCM-2004, cuyas variables se describen en el capítulo 4:

$$V_{mR} = F_R (0.5v_m^* A_T + 0.3P) \quad (6.13)$$

Para lo cual tenemos en una primera parte la ecuación 6.13, de la cual obtenemos una v_{meq}^* (resistencia de diseño a compresión diagonal equivalente), donde: V_{mR} es la obtenida experimentalmente, $F_R = 1$, A_T , es el área de los muros de mampostería combinada y P es la carga vertical aplicada a esta mampostería. Por lo tanto:

$$\text{despejando } v_{meq}^* = \frac{V_{mR} - 0.3P}{0.5A_T} ; v_{meq}^* = 3.145 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

Paso seguido, se tomaron los parámetros de los muros ensayados en el CENAPRED, tales como: $A_{T2} = 3000 \text{ cm}^2$ y $P_2 = 15 \text{ ton}$. Sustituyendo estos datos y v_{meq}^* , obtuvimos:

$$V_{mReq} = F_R (0.5v_{meq}^* A_{T2} + 0.3P_2) ; V_{mReq} = 9.21 \text{ ton}$$

Considerando que tanto en muretes como en muros tamaño natural, la carga resistente está relacionada directamente con el área transversal de los elementos y la carga vertical aplicada, se considera que hacer esta equivalencia es razonable, para comparar en igualdad de circunstancias la carga de agrietamiento de los muros de mampostería combinada y confinada con la del muro ensayado en el CENAPRED.

Como se observa a partir de estos cálculos, la carga de agrietamiento equivalente para un muro de mampostería combinada y confinada es de 9.2 ton, mientras que para el muro de mampostería confinada (construido exclusivamente con ladrillo rojo recocido), la carga de agrietamiento que se obtuvo experimentalmente fue de 9.6 ton. Por lo tanto, los valores de agrietamiento bajo esta equivalencia son bastante más parecidos, resultando aún mayores para los muros confinados elaborados exclusivamente con ladrillos. Es claro que el efecto de la carga vertical de compresión es muy importante en que las resistencias obtenidas se aproximen tanto, dado que en nuestros ensayos, sólo se pudo aplicar una carga de 2.2 toneladas, en lugar de las 15 toneladas que se aplicaron en los modelos del CENAPRED.

6.10. Comportamiento del refuerzo longitudinal en castillos

En este apartado se presentan los registros de los deformímetros (strain gages) adheridos al refuerzo longitudinal de los castillos de los dos especímenes. Los deformímetros se fijaron al acero de refuerzo longitudinal en secciones consideradas críticas (Capítulo 5). El estudio de los esfuerzos y las deformaciones del refuerzo en estas secciones permitió conocer con mayor detalle el comportamiento global del confinamiento. Se analiza principalmente la etapa de fluencia.

Consideraciones sobre el análisis

Las consideraciones que se establecieron para el análisis de los deformímetros fueron principalmente: a) se tomó un esfuerzo de fluencia de 4200 kg/cm^2 y b) una deformación unitaria de fluencia de 0.002.

En este análisis, las deformaciones registradas (ϵ) por los deformímetros se transformaron a esfuerzos mediante la Ley de Hooke (ecuación 6.14). En la figura 6.43 se muestra un ejemplo de la curva esfuerzo-deformación obtenida para una de las varillas.

$$\sigma = E_s \varepsilon \quad (6.14)$$

donde:

E_s módulo de elasticidad del acero de refuerzo ordinario igual a $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
 ε deformación unitaria registrada por los strain gages

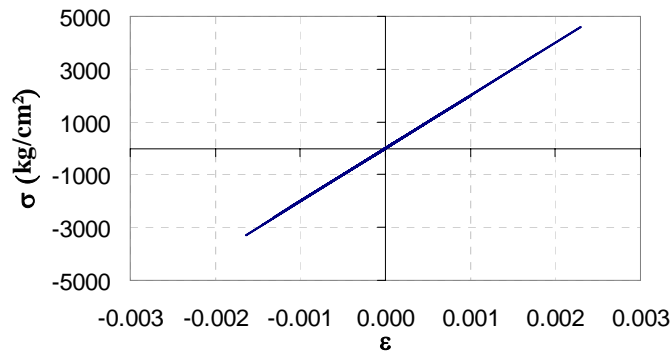
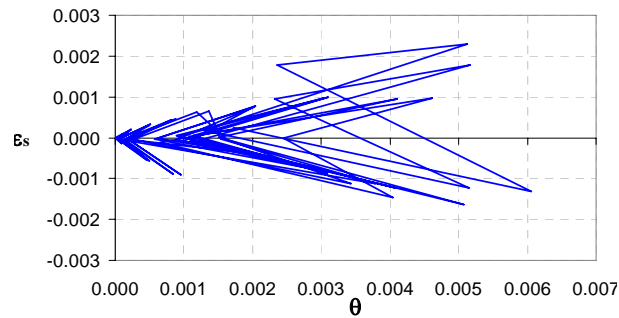
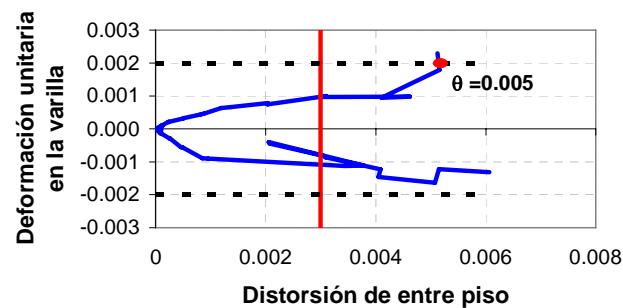


Figura 6.37. Comportamiento histerético del refuerzo longitudinal en los castillos de un muro de mampostería confinada y combinada (S1, muro MCC-1)

Se graficó la curva distorsión de entrepiso contra la deformación unitaria del refuerzo longitudinal en los castillos, con el objetivo de ubicar la fluencia del acero durante las etapas de carga y distorsión aplicadas a los muros. En la figura 6.38 se presenta el comportamiento de una de las varillas, así como la distorsión de fluencia.



a) Curva experimental cíclica (S1, muro MCC-1)



b) Envolvente de la curva cíclica (S1, muro MCC-1)

Figura 6.38. Gráfica distorsión de entrepiso del muro contra la deformación unitaria del acero longitudinal.

En la tabla 6.11 se presenta un resumen de la distorsión de entrepiso a la que fluyó el acero de cada castillo (figura 6.38). Los valores reportados para el muro MCC-1 lucen razonables, sin embargo, las distorsiones de entrepiso asociadas a las lecturas de deformaciones de fluencia en los strain gages de las varillas de los castillos del muro MCC-2 parecen demasiado bajas y deberá revisarse con mayor detalle la consistencia de estos resultados para valorar si éstas no se deben a algún defecto involuntario en su pegado y colocación, o que simplemente hayan resultado defectuosos. Cabe señalar que el refuerzo longitudinal de la dala no experimentó fluencia en ninguno de los dos muros ensayados.

Tabla 6.11. Distorsiones de fluencia del refuerzo longitudinal de los castillos

Strain gage	Distorsión del muro MCC-1 a la que se alcanzó la fluencia del refuerzo del castillo	Distorsión del muro MCC-2 a la que se alcanzó la fluencia del refuerzo del castillo
S1	0.00512	0.00001 ²
S2	0.00516	0.00095 ²
S3	NF	0.0038
S4	0.00507	0.0018 ²
S5	0.01 ¹	NF
S6	0.009 ¹	NF
S7	NF	NR
S8	NF	NF

1 Esta varilla desarrolló su fluencia una vez que el muro MCC-1 se deslizó, alcanzando una deformación unitaria de 0.005.

2 Valores de lectura experimental que requieren de un análisis más complejo

NF No alcanzó la fluencia

NR No se registraron lecturas

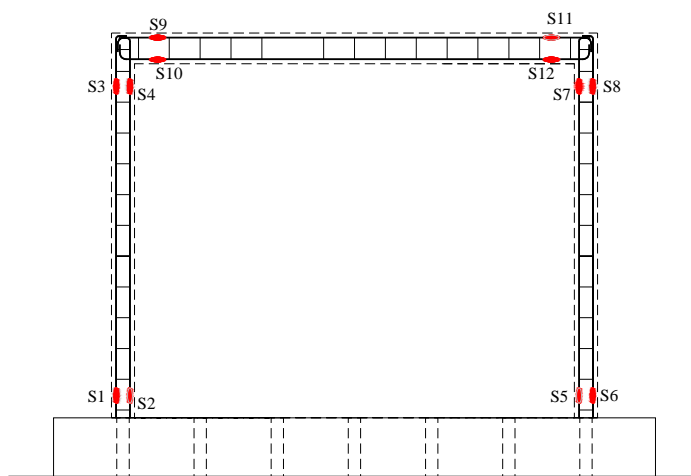


Figura 6.39. Ubicación de los strain gages

CAPÍTULO 7

COMPARACIÓN DE LAS CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN CON MODELOS ANALÍTICOS PROPUESTOS PARA MAMPOSTERÍA CONFINADA

Realizar ensayos experimentales en muros de mampostería confinada resulta laborioso, tardado y costoso. Es verdad que se obtiene información valiosa, que frecuentemente sirven como base a distintas disposiciones de los reglamentos de diseño. Sin embargo, esta técnica tiene limitaciones. Por ejemplo, no puede diseñarse cada edificio o casa de mampostería con base en un ensayo experimental de un modelo análogo tridimensional, ni siquiera para diseños tipo de estructuras que se construyen masivamente, sino que el diseño de estos sistemas complejos se hace con base en extrapolar los resultados del comportamiento observado en ensayos de elementos tipo, en particular los muros, que es el elemento estructural principal en los sistemas con base en mampostería. Es por ello que es importante contar con modelos analíticos confiables para reproducir su comportamiento experimental, tanto en el intervalo elástico, como en el no lineal.

Desde los años 70's Meli propuso un modelo histerético trilineal, el cual establecía parámetros en función de los resultados obtenidos de una serie de ensayos ante carga lateral de muros de mampostería (con diferentes variantes). Meli sólo planteó su modelo para cargas monótonas. En la década de los noventa Moroni *et al*, propone otro modelo de histéresis. Al igual que Meli, propone una curva carga deformación caracterizada por tres etapas. Otros investigadores como Bazán en 1980 y Tomazevic y Lutman también han propuesto modelos analíticos igualmente caracterizados por curvas trilineales (Flores y Alcocer, 2001).

Flores y Alcocer proponen un modelo trilineal con base en evidencia experimental de muros de mampostería confinada (figura 7.1). Este modelo considera degradación de rigidez y resistencia, esta última variable no la consideran en sus modelos Moroni *et al*, Meli y Bazán.

Este modelo se calibró con muros de uno y dos pisos con y sin refuerzo horizontal, respuestas dinámicas de estructuras de un grado de libertad y la aplicación del modelo en estructuras de mampostería empleando registros sísmicos reales (Flores y Alcocer, 2001).

Por todo lo anterior, se decidió utilizar este modelo, en particular para comparar las curvas carga lateral-deformación con la curva obtenida por el modelo de Flores y Alcocer. Aunque el modelo de Flores y Alcocer se restringe a muros de mampostería confinada,

construidos a base de tabiques de barro recocido, los autores mencionaron que esperarían comportamientos similares con materiales como bloques de concreto.

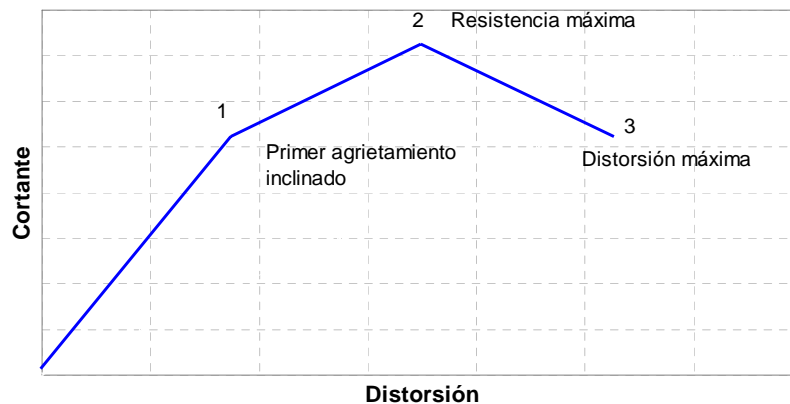


Figura 7.1. Envolvente trilineal del modelo propuesto por Flores y Alcocer

En términos generales, el modelo consiste en construir la curva histerética siguiendo una rama ascendente de cada ciclo con cierta rigidez, hasta alcanzar el primer agrietamiento, y seguir sobre la envolvente hasta la carga máxima. Al descargar, la trayectoria es una línea recta cuya pendiente depende de la distorsión máxima alcanzada hasta ese momento (figura 7.1).

El modelo propuesto por Flores y Alcocer involucra seis variables que dependen de la resistencia y deformación de la estructura. Las variables que considera son:

K_0	Rigidez inicial de la estructura
$V_{agr.}$	Carga correspondiente al agrietamiento de la mampostería
$V_{max.}$	Carga máxima
V_u	Carga última
H	Altura del espécimen
θ_{Vmax}	Distorsión asociada a la carga máxima
θ_u	Distorsión asociada a la carga última

Las diferencias entre los muros ensayados en el Cenapred y lo aquí reportados en cuanto a geometría, materiales y valor de la carga vertical aplicada se han discutido previamente en el Capítulo 6. Para la aplicación del modelo de Flores y Alcocer se utilizaron los resultados obtenidos de los ensayos a los muros MCC-1 y MCC-2, indicados en negritas en la tabla 7.1. Para la resistencia última y su distorsión asociada, así como la distorsión asociada a la carga máxima, se utilizan los datos que recomiendan Flores y Alcocer para mampostería confinada sin refuerzo horizontal. Estos datos se presentan en la tabla 7.1.

En la figura 7.2 se comparan las graficas de histéresis experimentales para los especímenes MCC-1, MCC-2 y las calculadas con el modelo propuesto por Flores y Alcocer. Como se observa, el modelo analítico propuesto por Flores y Alcocer tiene la capacidad de representar de forma muy razonable la respuesta histerética obtenida experimentalmente, inclusive para el muro MCC-2, en el cual para los semiciclos positivos, no se completaron al final de la prueba. Esto es notable, pues el modelo de Flores y Alcocer se desarrolló

empleando una base experimental de ensayos de mampostería confinada elaborada con tabiques de barro recocido exclusivamente.

Tabla 7.1 Datos experimentales (absolutos) de los muros MCC-1 y MCC-2

Variable	K_0 Ton-cm	V_{agr} Ton	V_{max} Ton	V_u Ton	H cm	θ_{Vmax}	θ_u
MCC-1	62.9	5.0	8.17	4.0 ¹	210.5	0.003 ²	0.01 ²
MCC-2	43.7	5.0	8.35	4.0 ¹	220.0	0.003 ²	0.01 ²

¹ Carga ultima, $V_u = 0.8 * V_{agr}$, según propuesta de Flores y Alcocer

² Valores de parámetros fijados por Flores y Alcocer

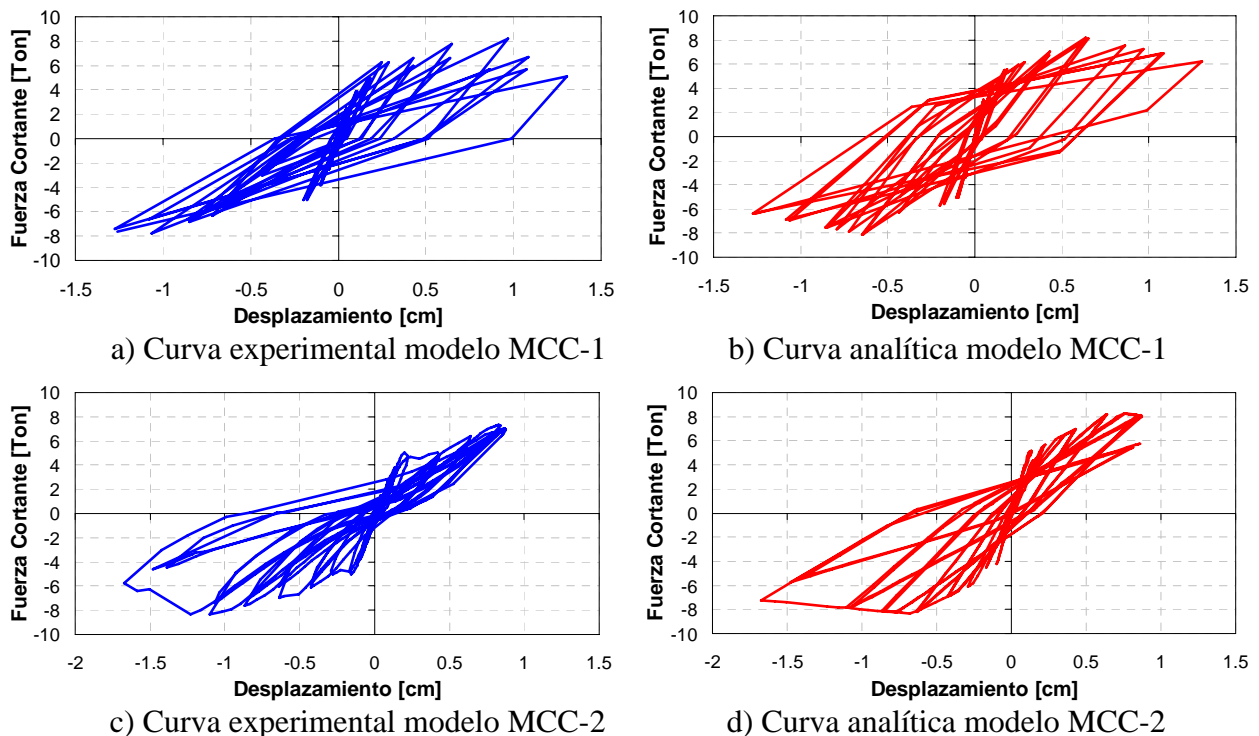
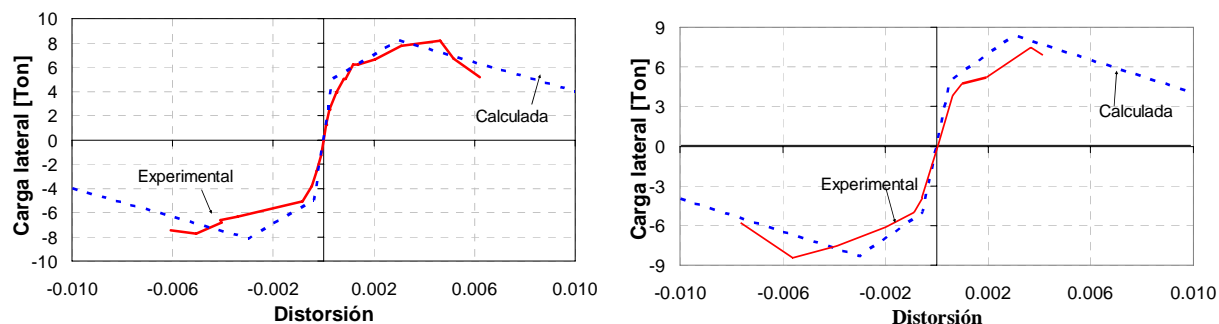


Figura 7.2. Curvas de histéresis experimental versus calculada con el modelo analítico

Al graficar las envolventes generadas a partir de las curvas de histéresis (figura 7.3), se corrobora lo razonable de la aproximación de las curvas analíticamente obtenidas con las experimentales, aunque cabe destacar que la predicción analítica tiende a sobrestimar la deformación de colapso, a subestimar la pendiente de ablandamiento de la mampostería confinada y combinada, toda vez que se alcanza su resistencia última, además de ubicar con precisión la distorsión donde se presentó la resistencia última. No obstante, el grado de aproximación es notable.

Para mejorar la aproximación, se ajustaron todos los parámetros que involucra el modelo, con base en los resultados experimentales, para lo cual se calculó el promedio de los valores obtenidos en ambos cuadrantes. Los parámetros se resumen en la tabla 7.2. Las curvas analíticas obtenidas con estos ajustes se comparan con las experimentales en las figuras 7.4 y

7.5, donde se aprecia claramente una mejor correlación en las envolventes (figura 7.5), y en las curvas de histéresis del muro MCC-2 (figura 7.4).



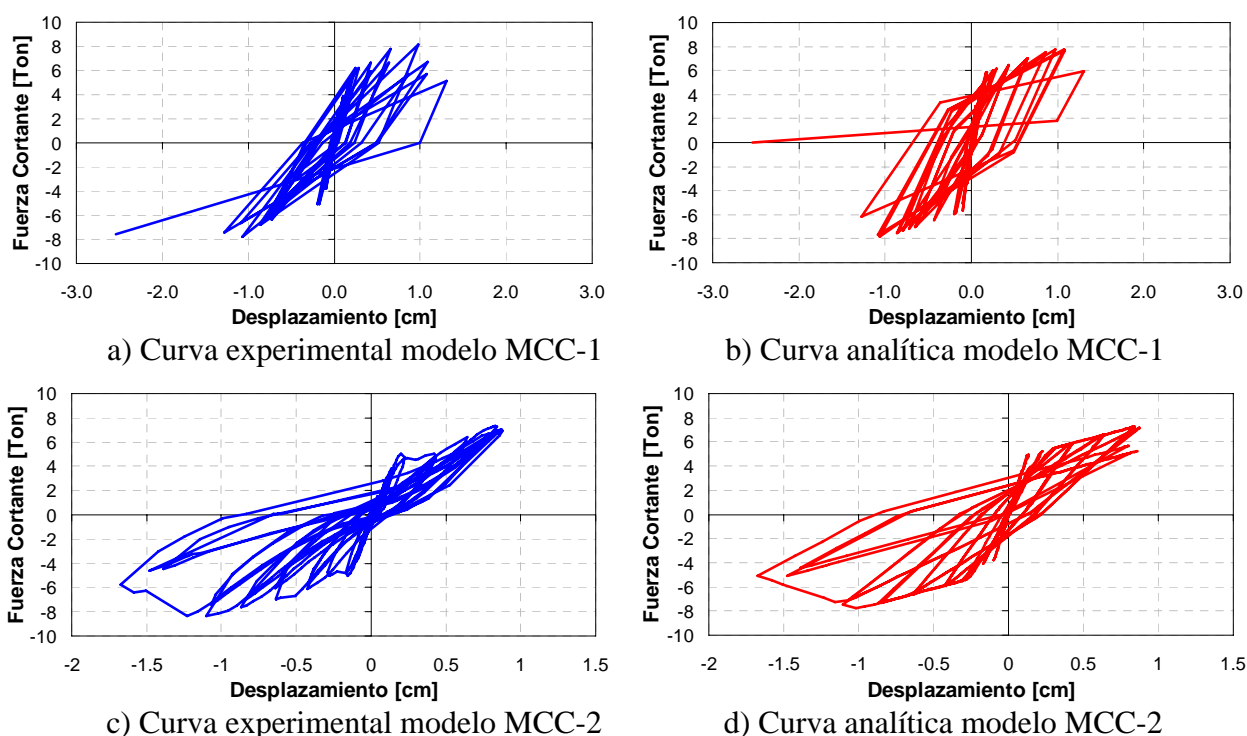
a) Envolvente experimental vs propuesta para el modelo histérico, muro MCC-1 b) Envolvente experimental vs propuesta para el modelo histérico, muro MCC-2

Figura 7.3. Envolvente trilineal del modelo propuesto por Flores y Alcocer vs envolvente experimental

Tabla 7.2 Datos experimentales (promedio) de los muros MCC-1 y MCC-2

Variable	K_0 Ton-cm	V_{agr} Ton	V_{max} Ton	V_u Ton	H cm	θ_{Vmax}	θ_u
MCC-1	61.5	5.65	7.97	6.28	210.5 ¹	0.0048	0.006
MCC-2	39.5	4.9	7.83	5.66	220.0 ¹	0.0046	0.007

¹ Único parámetro que no se modificó



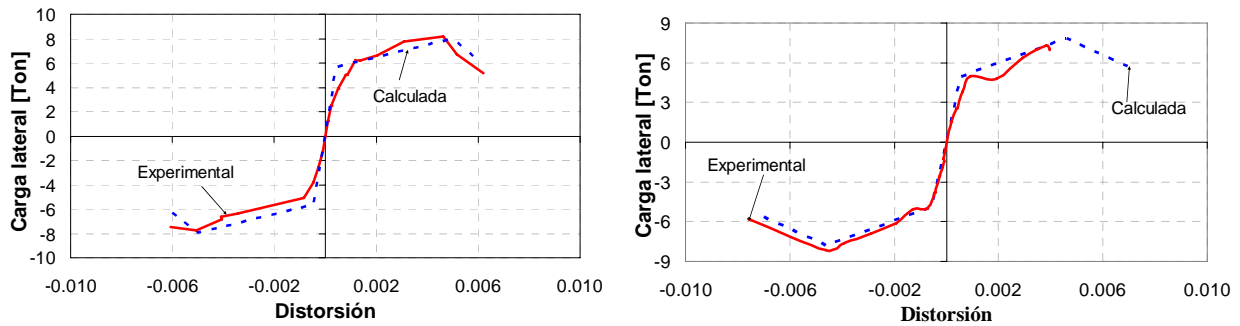
a) Curva experimental modelo MCC-1

b) Curva analítica modelo MCC-1

c) Curva experimental modelo MCC-2

d) Curva analítica modelo MCC-2

Figura 7.4. Curvas de histéresis experimental versus calculada con el modelo analítico



a) Envoltente experimental vs propuesta para el modelo histérico, muro MCC-1 b) Envoltente experimental vs propuesta para el modelo histérico, muro MCC-2

Figura 7.5. Envoltente trilineal del modelo propuesto por Flores y Alcocer vs envoltente experimental.

Finalmente, se consideró interesante comparar la predicción de la respuesta de estos muros si, *a-priori*, se utilizan sus propiedades mecánicas (v_m^* , E_m y G_m) determinadas con base en los ensayos simples de muretes y pilas, además de las propiedades de su sección transversal y dimensiones, suponiendo que esto se realiza antes del ensayo experimental del muro en sí. Dado que en los ensayos de los muretes del arreglo 1 se apreciaron deslizamientos que pudieran redundar, en opinión del que escribe, en resistencias menos representativas, se decidió realizar esta comparación sólo con las propiedades mecánicas reportadas para el arreglo 2.

Bajo esta óptica, los datos para el alimentar al modelo de Flores y Alcocer son:

Rigidez inicial (K_0) de la estructura, que se obtuvo de acuerdo a la expresión 7.1 (Flores y Alcocer, 2001).

$$R_{inicial} = \left(\frac{H^3}{\beta EI} + \frac{H}{GA} \right)^{-1} \quad (7.1)$$

donde:

H	Altura del muro
E	Módulo de elasticidad de la mampostería combinada ($E_m = 11944.3 \text{ kg/cm}^2$)
G	Módulo de cortante de la mampostería combinada ($G_m = 4006.7 \text{ kg/cm}^2$)
A	Área de la sección transversal del muro
β	Rigidez como voladizo
I	momento de inercia del muro

Tomando las propiedades mecánicas de la mampostería combinada reportadas en el Capítulo 3 de este estudio, obtuvimos una rigidez inicial de:

$$R_{inicial} = 49.1 \text{ ton/cm}$$

La carga correspondiente al agrietamiento de la mampostería ($V_{agr.}$), se obtuvo de acuerdo a la expresión 5.7 de la NTCM-2004. Para el calculo de esta variable se tomó tanto

v_m^* , como lo establece la norma, como la resistencia media a compresión diagonal de los muretes.

$$v_m^* = 2.57 \text{ kg/cm}^2$$

$$\bar{v}_m = 3.86 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto:

$$V_{agr.} = F_R (0.5 v_m^* A_T + 0.3 P) = 4206.6 \text{ kg}$$

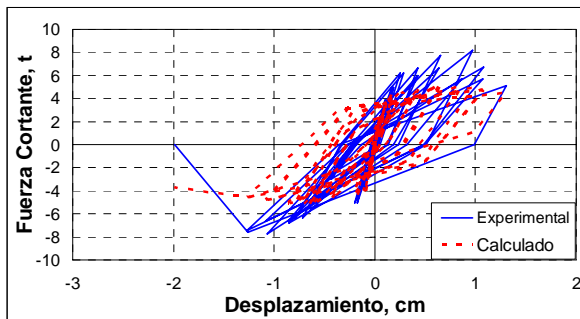
$$V_{agr.} = F_R (0.5 \bar{v}_m A_T + 0.3 P) = 5931.6 \text{ kg}$$

Las demás variables se determinaron a partir de las recomendaciones de los autores del modelo analítico, estas se resumen en la tabla 7.3.

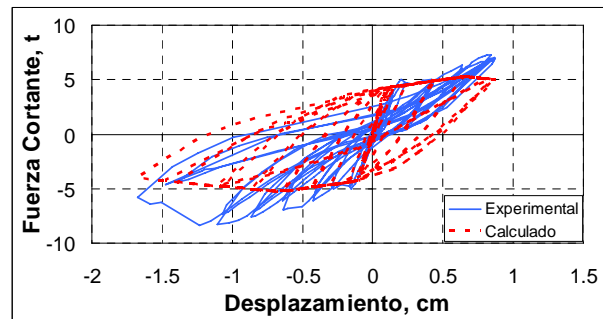
Tabla 7.3 Datos teóricos de un muros de mampostería combinada y confinada

Variable	K_0 Ton-cm	V_{agr} Ton	V_{max} [1.25 V_{agr}] Ton	V_u [0.8 V_{agr}] Ton	H [real] cm	θ_{Vmax}	θ_u
Mampostería combinada y confinada con v_m^*	49.1	4.2	5.26	3.36	220	0.003	0.01
Mampostería combinada y confinada con \bar{v}_m	49.1	5.9	7.41	4.75	220	0.003	0.01

Las curvas calculadas con los valores asociados con v_m^* se muestran con línea discontinua en la figura 7.6, donde se comparan con la experimental. Se aprecia que se subestima la resistencia a cortante y que se predice un comportamiento cíclico más estable que el obtenido experimentalmente.



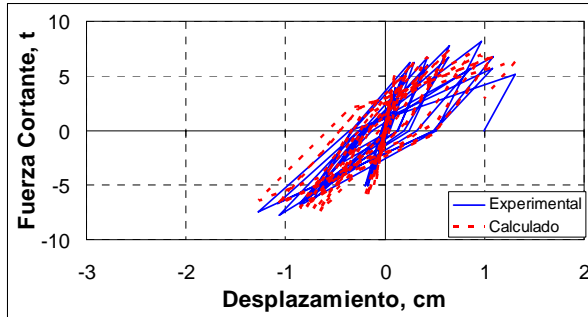
a) Curva experimental vs calculada, Muro MCC-1



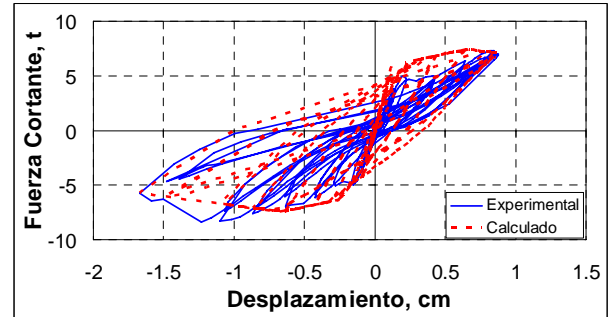
b) Curva experimental vs calculada, Muro MCC-2

Figura 7.6. Curvas de histéresis experimental versus calculada con el modelo analítico (v_m^*)

Igualmente, las curvas calculadas con los valores asociados con v_m se muestran con línea discontinua en la figura 7.7, donde se comparan con la experimental. En este caso, se aprecia que la estimación de la respuesta con el modelo analítico está más apegada a la realidad experimentalmente registrada.



a) Curva experimental vs calculada, Muro MCC-1



b) Curva experimental vs calculada, Muro MCC-2

Figura 7.7. Curvas de histéresis experimental versus calculada con el modelo analítico (v_m)

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

México es un país donde prolifera la autoconstrucción, sobre todo en zonas rurales, pueblos y ciudades pequeñas y zonas marginadas de las grandes ciudades. A lo largo y ancho de la República Mexicana se pueden ver edificaciones de mampostería que son de autoconstrucción.

La demanda de viviendas en México, sobre todo en las zonas conurbanas de algunas ciudades, obliga a recurrir a nuevos sistemas constructivos que permitan un ahorro, tanto en costos de materiales como en tiempos de ejecución. Uno de los nuevos sistemas empleados es mediante bloques de concreto ligero y tabiques de barro recocido, alternados en hiladas, al cual lo definimos como mampostería combinada. Este tipo de mampostería, que cae dentro de la confinada, permite un ahorro en costos y tiempos de ejecución, además de tener una apariencia agradable o estética.

Esta modalidad es de origen autóctono, tiene sus antecedentes en algunas construcciones coloniales donde se alternaban piedras naturales con ladrillos, pero se populariza en tiempos recientes principalmente por la iniciativa e inquietud de los habitantes de los estados de Puebla, Tlaxcala, Hidalgo, Oaxaca y Estado de México, quienes intentaron resolver con esta modalidad de manera económica el problema de agrietamiento que presentan los muros de bloques, por lo que decidieron alternarlos con ladrillos rojos para evitar la propagación de grietas en los bloques de concreto, funcionando satisfactoriamente para el caso de asentamientos. Esta modalidad comienza a utilizarse también en el Distrito Federal y de manera predominante en otros estados de la República Mexicana.

La investigación experimental que se había hecho en México en mampostería no contempla a la mampostería combinada descrita anteriormente, por lo que surge necesidad de estudiarla, para valorar sus mecanismos de resistencia y deformación ante la eventual acción de sismos, ya que se está utilizando en zonas sísmicas de México.

Este trabajo presenta los resultados más relevantes del ensaye cíclico de dos muros de mampostería combinada y confinada. Los ensayos se realizaron conforme al protocolo para ensayos cíclicos establecido en el Apéndice A de las Normas Técnicas para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004), por lo que los especímenes se sujetaron a ciclos repetidos, primero ante cargas dadas (hasta la carga de agrietamiento), y después a deformaciones (distorsiones angulares) dadas de manera creciente.

Se valoraron tanto los mecanismos resistentes, como las características de deformación de esta modalidad de mampostería, evaluando parámetros útiles para fines de análisis y

diseño, como son la estimación de cargas resistentes a partir de propiedades índice, la misma definición de las propiedades índice de cada material utilizado y del conjunto, definición de distorsiones índice y sus índices de daño asociados, características de degradación de rigidez y de disipación de energía, entre muchos otros aspectos relevantes. Además, se hicieron comparaciones generales con respecto a los resultados del modelo M-E-06 (muro de tabique rojo recocido confinado ensayado en el Cenapred).

Del Capítulo 3 se desprenden las siguientes conclusiones:

- Las propiedades mecánicas (E_m y G_m) de la mampostería combinada siendo aun más heterogénea que la mampostería construida con un solo tipo de pieza, no varían demasiado, ya que las simplificaciones utilizadas en las NTCM-2004, pueden ser utilizadas también para este tipo de material, puesto que valores como el de $0.4G_m$ tiene una correspondencia similar. También el termino $800f_m^*$, predice de forma adecuada el módulo de elasticidad.
- La expresión de la NTCM-2004 para determinar la resistencia a cortante de la mampostería es conservadora para predecir la carga de agrietamiento para la mampostería combinada en un 34 % aproximadamente. Se obtuvo una v_m^* de 1.92 kg/cm^2 (valor promedio de los dos muros), y una carga de agrietamiento experimental de 5.0 ton. Cabe mencionar que para el cálculo v_m^* correspondiente a los muretes con el arreglo 1, el coeficiente de variación fue de 0.5, hecho que castigó en demasía esta resistencia, por ser muy alto.
- El tipo de bloque utilizado la mampostería combinada es de propiedades muy malas, estando su resistencia por la mitad de lo que pide la norma NMX-C-404-ONNCCE.
- El mortero usado fue el tipo I que recomiendan las NTCM-2004, con un proporcionamiento igual a: 1 parte de cemento; 0.25 partes de cal y 3.5 partes de arena.
- A pesar de que se obtuvieron propiedades mecánicas aceptables de la mampostería combinada, se recomienda hacer ensayos de mampostería a nivel muretes y pilas con diferentes tipos de arreglo, ya que como se presenta en este estudio sólo se ensayaron dos tipos de arreglo, quedando por ensayar varios más. Aun así los resultados obtenidos se consideran aceptables. Se recomienda, además, repetir este protocolo de ensaye con los otros tipos de mortero recomendados por las NTCM-2004: los morteros tipo II y III, donde en teoría deben presentarse valores promedio inferiores a los aquí reportados.

A partir del análisis experimental de los muros de mampostería combinada y confinada se realizan las siguientes observaciones:

- Esta modalidad de mampostería desarrolla resistencias de agrietamiento, máxima y última menores a las de la mampostería confinada común construida sólo con ladrillo rojo recocido.
- En términos de deformación lateral, su comportamiento es similar hasta la carga máxima, discrepando en las deformaciones últimas que pueden desarrollar, ya que en los muros de mampostería combinada y confinada ensayados la deformación última que se presentó estuvo por debajo de la reportada en el muro confinado de tabique rojo recocido ensayado en el Cenapred. Deberá valorarse en estudios futuros si en esto también impacta la diferencia en el nivel de esfuerzo de compresión aplicado.
- El comportamiento histerético que se observó, es estable hasta una distorsión de 0.006 para el primer muro y de 0.004 para el segundo muro. Se definió una envolvente de la curva histerética, en la que se distingue más claramente que el comportamiento se puede caracterizar en tres etapas: la elástica (previa al primer agrietamiento), la inelástica ascendente, en la que se tiene capacidad a tomar mayor carga hasta alcanzar su resistencia máxima, pero con una pérdida de rigidez, y la inelástica descendente (conocida como la curva de ablandamiento), donde se degrada súbitamente tanto la rigidez como la resistencia.
- Dadas sus características geométricas, de refuerzo y condiciones de frontera (apoyo y cargas), el modo de falla es por cortante, conforme a lo esperado.
- El cortante y la distorsión de agrietamiento en ambos muros ensayados fueron muy parecidos, siendo $V_{agr}=5.0$ ton y $\theta_{agr}= 0.0008$, aproximadamente.
- De acuerdo al nivel de daño observado durante los ensayos, se propone una distorsión de diseño igual 0.003 para muros con uso estructural, que permitiría que un muro de mampostería combinada y confinada tenga un nivel de daño que pueda ser reparable de manera económica, al mismo tiempo de garantizar su estabilidad, proporcionando de esta manera seguridad a las personas que puedan habitar las estructura que los contenga, sobre todo si el sistema estructural ante cargas verticales y laterales es con base en muros de este tipo. En cambio, si se utiliza como muro diafragma, el límite actual de 0.006 propuesto por las NTCM-2004 parece ser razonable también para esta modalidad de mampostería.
- De los ensayos realizados, se concluye que la mampostería combinada y confinada es un sistema estructural apto si se pega con mortero tipo I. Sin embargo, se sugiere que en futuras investigaciones se analicen muros de mampostería combinada y confinada pegados con otros morteros, como por ejemplo: (1) el mortero utilizado por los albañiles en la autoconstrucción y, (2) los morteros tipo II y III establecidos por las NTCM-2004. Con ello, se tendría un panorama más amplio acerca del comportamiento de este tipo de mampostería y si este sistema es apto para resistir sismos para cualquier tipo de mortero de los que se usan en la práctica en México. Dado los consumos de cemento y su trabajabilidad, el mortero tipo I difícilmente se encuentre en muros de autoconstrucción. Se sabe que la calidad del mortero afecta de distintas maneras las

propiedades mecánicas y la respuesta global de elementos de mampostería. Esto debe valorarse experimentalmente. Por ejemplo, en los reglamentos de los Estados Unidos no se permite utilizar morteros tipo N y O (similares al mortero tipo III y al de autoconstrucción) en estructuras de mampostería ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico, como por ejemplo, California.

- Se evaluó si el modelo analítico propuesto por Flores y Alcocer también puede representar razonablemente la respuesta histerética experimental de los muros de mampostería combinada y confinada, obteniéndose resultados bastante satisfactorios. Por ejemplo, si al modelo se le alimenta con variables determinadas a partir de los ensayos experimentales, el modelo es bastante robusto y predice razonablemente los lazos histéresis y la envolvente asociada a éstos. En cambio, si en el modelo se alimenta con los datos provenientes de propiedades índice determinadas del ensaye de muretes y pilas, este tiende a subestimar las resistencias máxima y de agrietamiento, y a predecir curvas de histéresis y envolventes algo distintas a las experimentales, aunque la predicción de los niveles de deformación que pueden desarrollarse son bastante más razonables que los de resistencia.
- Se valoró también el índice de Kwok y Ang, que fue desarrollado a partir de ensayos experimentales hechos en China de muros de mampostería no reforzada con base en ladrillos. En este trabajo se propone un ajuste preliminar a este índice para mampostería combinada y confinada, reconociendo que los resultados de dos muros son insuficientes para darle robustez final al ajuste propuesto. El ajuste hecho define que el intervalo de daño reparable de este índice debe estar entre 0.0 y 0.4, tomando como referencia la distorsión de diseño propuesta para el sistema que es $\theta=0.003$. Fue necesario hacer un ajuste preliminar de la constante ε del índice, basándonos sólo en los resultados experimentales de los dos muros ensayados. Cabe señalar que esta es una propuesta preliminar que deberá pulirse conforme se cuente con un mayor número de resultados experimentales de muros de estas características.

APÉNDICE A

CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En el presente apartado se reporta con detalle los datos experimentales obtenidos de las pruebas de los materiales utilizados en el estudio, así como los cálculos realizados. El objetivo principal es mantener a la disposición de los interesados la serie de resultados que se obtuvieron de los diferentes ensayos a los materiales, con el afán de mantener transparentes los datos del estudio y para futuras consultas.

Los resultados se plasman en las siguientes secciones por tipo de material, presentando en cada parte un informe detallado de dimensiones y cargas últimas aplicadas a los especímenes. Se presentan en el siguiente orden: concreto, mortero y mampostería.

A.1 Resistencia a compresión del concreto

Se realizaron ensayos a compresión de cilindros de concreto conforme a la norma mexicana NMX-C-ONCCE-2002 (figura A.1), en la maquina universal del Laboratorio de Estructuras de la UAM.

La resistencia de diseño para los diferentes elementos estructurales varió, en función del trabajo que realizaría cada estructura, así pues, el concreto se fabricó en el Laboratorio de Estructuras de la UAM, para cada elemento con las siguientes características.

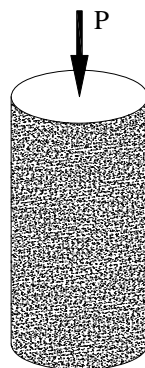


Figura A.1. Ensayo de cilindro de concreto a compresión

A.1.1. Viga de reacción

El concreto empleado en la construcción de la viga de reacción se fabricó con una dosificación para una resistencia $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$. En la tabla A.1 se presentan los resultados de los ensayos realizados a los cilindros de la viga de reacción.

Ensaye: Cilindros de concreto
 Espécimen: Viga de reacción
 Fecha de fabricación: 10 de febrero del 2004
 Fecha de prueba: 29 de septiembre del 2004

Tabla A.1. Resultados de los cilindros de la viga de reacción

Cilindro	Área cm^2	Carga kg	σ kg/cm^2
1	176.71	55075	311.7
2	176.71	62994	356.5
3	176.71	62594	354.2

Esfuerzo medio = 340.8 kg/cm^2
 Desviación estándar = 25.2 kg/cm^2
 Coeficiente de variación = 0.07

A.1.2. Castillos

El concreto empleado en la construcción de los castillos se fabricó con una dosificación para una resistencia $f'_c = 150 \text{ kg/cm}^2$. En la tabla A.2 y A.3 se presentan los resultados de los ensayos realizados a los cilindros de concreto correspondientes a cada muro de prueba.

Castillos del muro MCC-1

Ensaye: Cilindros de concreto
 Espécimen: Castillos Muro MCC-1
 Fecha de fabricación: 19 de Agosto del 2004
 Fecha de prueba: 01 de octubre del 2004

Tabla A.2. Resultados de ensayos a compresión al concreto de los castillos del muro MCC-1

Cilindro	Área cm^2	Carga kg	σ kg/cm^2	Observaciones
1	174.27	29173.7	167.4	Sólo se fabricaron 2 cilindros
2	174.27	34330.1	197.0	

Esfuerzo medio = 182.2 kg/cm²
 Desviación estándar = 20.9 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.11

Castillos del muro MCC-2

Ensaye: Cilindros de concreto
 Espécimen: Castillos Muro MCC-2
 Fecha de fabricación: 26 de Enero del 2006
 Fecha de prueba: 02 de Marzo del 2006

Tabla A.3. Resultados de ensayos a compresión al concreto de los castillos del muro MCC-2

Cilindro	Área cm ²	P kg	σ kg/cm ²
1	162.9	25700	158
2	179.1	22300	125
3	181.9	25300	139

Esfuerzo medio = 140 kg/cm²
 Desviación estándar = 16.7 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.12

A.1.3. Dala y losa

El concreto empleado en la construcción de la dala y losa se fabricó con una dosificación para una resistencia $f'_c = 250$ kg/cm². En las tablas A.4, A.5 y A.6 se presentan los resultados de los ensayos realizados a los cilindros de concreto correspondientes a cada muro de prueba.

La variación en resistencia entre la dala y los castillos se debió principalmente al requerimiento, de que tanto la dala como la losa trabajaran en conjunto. Para el primer muro, ambos elementos se colaron por separado, pero para el segundo espécimen (muro MCC-2) se colaron monolíticamente.

Dala del muro MCC-1

Ensaye: Cilindros de concreto
 Espécimen: Dala Muro MCC-1
 Fecha de fabricación: 10 de septiembre del 2004
 Fecha de prueba: 23 de Noviembre del 2004

Tabla A.4. Resultados de ensayos a compresión al concreto de la dala del muro MCC-1

Cilindro	Área cm ²	Carga kg	σ Kg/cm ²	Observaciones
1	174.2731	41600	238.7	Sólo se fabricaron 2 cilindros
2	174.2731	42000	241.0	

Esfuerzo medio = 239.9 kg/cm²
 Desviación estándar = 1.6 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.01

Losa del muro MCC-1

Ensaye: Cilindros de concreto
 Espécimen: Losa MCC-1
 Fecha de fabricación: 19 de enero del 2005
 Fecha de prueba: 17 de Mayo del 2005

Tabla A.5. Resultados de ensayos a compresión al concreto de la losa del muro MCC-1

Cilindro	Área cm ²	Carga kg	σ kg/cm ²
1	176.7	44100	249.6
2	176.7	41300	233.7
3	176.7	43300	245.0

Esfuerzo medio = 242.8 kg/cm²
 Desviación estándar = 8.2 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.03

Dala y losa del muro MCC-2

Ensaye: Cilindros de concreto
 Espécimen: Dala y losa muro MCC-2
 Fecha de fabricación: 01 de Febrero del 2006
 Fecha de prueba: 02 de Marzo del 2006

Tabla A.6. Resultados de ensayos a compresión al concreto de la dala y losa del muro MCC-2

Cilindro	Área cm ²	P kg	σ kg/cm ²
1	176.7	44000	249
2	179.1	44150	247

Esfuerzo medio = 248 kg/cm²

Desviación estándar = 1.73 kg/cm²

Coefficiente de variación 0.01

A.2 Propiedades del mortero de pega

A.2.1. Resistencia a la compresión del mortero

Las propiedades de este material fueron determinadas mediante el ensaye a compresión de cubos de 5 cm de arista (figura A.2). El ensaye de los cubos de mortero se realizó de acuerdo con la NMX-C-61-ONNCCE-1976. La resistencia de diseño se calculo a partir de muestras del mortero, para pegar piezas.

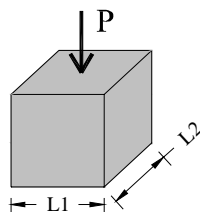


Figura A.2. Ensaye a compresión de cubos de mortero

El mortero empleado en la fabricación de los muros, pilas y muretes se dosificó en volumen para cumplir con las características de un mortero tipo I de acuerdo a las NTCM-2004.

Se obtuvieron cubos de mortero de cada una de las pruebas realizadas a la mampostería (pilas, muretes y muros a escala natural). Los resultados de estas pruebas se resumen en las tablas A.7, A.8, A.9, A.10, A.11 y A.12.

A.2.1.1. Mortero usado en muros

Muro MCC-1

Ensaye: Cubos de mortero Tipo I
 Espécimen: Muro de prueba MCC-1
 Fecha de fabricación:
 Fecha de prueba: 3 de Noviembre del 2005

Tabla A.7. Resultados de ensayos a compresión en cubos de mortero tipo I del muro MCC-1

Cubo	Área cm ²	P kg	σ kg/cm ²
1	25.7	9000	350
2	25.6	7800	305
3	25.4	7000	275
4	25.7	6800	265
5	25.4	8500	334
6	25.4	8200	322

Media = 308.6 kg/cm²
 Desviación estándar = 33.6 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.11
 Resistencia de diseño f_j^* = 205.7 kg/cm²

Muro MCC-2

Ensaye: Cubos de mortero Tipo I
 Espécimen: Muro de prueba MCC-2
 Fecha de fabricación: 21 de Enero del 2006
 Fecha de prueba: 15 de Marzo del 2006

Tabla A.8. Resultados de ensayos a compresión en cubos de mortero tipo I del muro MCC-2

Cubo	L1 cm	L2 cm	Área cm ²	P kg	σ kg/cm ²
1	4.94	4.96	24.5	2900	118 ¹
2	4.90	5.01	24.5	2900	118 ¹
3	4.98	5.03	25.0	7500	299
4	4.99	5.03	25.1	7500	299
5	5.03	5.07	25.5	7400	290
6	4.95	4.93	24.4	6900	283

¹ Para efectos de cálculo, se desecharon los valores de los dos primeros cubos

Media = 292.9 kg/cm²
 Desviación estándar = 7.8 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.03
 Resistencia de diseño f_j^* = 202 kg/cm²

A.2.1.2. Mortero usado en pilas

Ensaye: Cubos de mortero tipo I
 Espécimen: Pilas Arreglo 1
 Fecha de fabricación: 15 de junio del 2004
 Fecha de prueba: 23 de Noviembre del 2004

Pilas arreglo 1

Tabla A.9. Resultados de ensayos a compresión, mortero tipo I (pilas, arreglo 1)

Cubo	Área cm ²	P kg	σ kg/cm ²
1	25.0	5050	202
2	25.0	4975	199
3	25.0	5800	232

Media = 211.0 kg/cm²
 Desviación estándar = 18.2 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.09
 Resistencia de diseño f_j^* = 140.7 kg/cm²

Pilas arreglo 2

Ensaye: Cubos de mortero tipo I
 Espécimen: Pilas Arreglo 1
 Fecha de fabricación: 04¹ y 16² de Febrero del 2006
 Fecha de prueba: 15 de Marzo del 2006

Tabla A.10. Resultados de ensayos a compresión, mortero tipo I (pilas, arreglo2)

Cubo	L1 cm	L2 cm	Área cm ²	P kg	σ kg/cm ²
1 ¹	4.92	4.91	24.1	6750	280
2 ¹	4.94	5.00	24.7	7500	304
3 ¹	4.92	4.91	24.1	7000	290
4 ²	4.92	4.99	24.5	7550	308
5 ²	4.98	5.04	25.0	6960	278
6 ²	5.03	5.01	25.2	7300	290

Media =	291.4	kg/cm ²
Desviación estándar =	12.3	kg/cm ²
Coefficiente de variación	0.04	
Resistencia de diseño f_j^* =	201	kg/cm ²

A.2.1.3. Mortero usado en muretes

Muretes arreglo 1

Ensaye:	Cubos de mortero tipo I
Espécimen:	Muretes Arreglo 1
Fecha de fabricación:	3 de junio del 2004
Fecha de prueba:	16 de Febrero del 2005

Tabla A.11. Resultados de ensayos a compresión, mortero tipo I (muretes, arreglo1)

Cubo	Área cm ²	P kg	σ kg/cm ²
1	25.0	6325	253
2	25.0	6200	248
3	25.0	6400	256
4	25.0	6600	264
5	25.0	5200	208
6	25.0	6900	276

Media =	251	kg/cm ²
Desviación estándar =	23.02	kg/cm ²
Coefficiente de variación =	0.09	
Resistencia de diseño f_j^* =	167.2	kg/cm ²

Muretes arreglo 2

Tabla A.12. Resultados de ensayos a compresión, mortero tipo I (muretes, arreglo 2)

Cubo	Área cm ²	P kg	σ kg/cm ²
1	25.0	1654.9	66
2	25.0	1893.0	76
3	25.0	2090.0	84

Media = 75 kg/cm²
 Desviación estándar = 8.7 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.12
 Resistencia de diseño f_j^* = 50.1 kg/cm²

A.2.2. Peso volumétrico del mortero

El peso volumétrico que se calculó se basa en el peso promedio de los cubos de mortero y dividido entre el volumen del cubo. Los resultados se presentan en la tabla A.13

Tabla A.13. Peso volumétrico del mortero de pega

Cubo	L1 cm	L2 cm	Área cm ²	Peso kg	Peso volumétrico γ ton/m ³
1	4.92	4.91	24.1	0.185	1.53
2	4.94	5.00	24.7	0.192	1.56
3	4.92	4.91	24.1	0.186	1.54
4	4.92	4.99	24.5	0.193	1.57
5	4.98	5.04	25.0	0.192	1.53
6	5.03	5.01	25.2	0.199	1.58
7	4.94	4.96	24.5	0.194	1.59
8	4.90	5.01	24.5	0.194	1.58
9	4.98	5.03	25.0	0.202	1.61
10	4.99	5.03	25.1	0.200	1.59
11	5.03	5.07	25.5	0.201	1.58
12	4.95	4.93	24.4	0.193	1.58

Media = 1.57 kg/cm³
 Desviación estándar = 0.03 kg/cm³
 Coeficiente de variación = 0.02

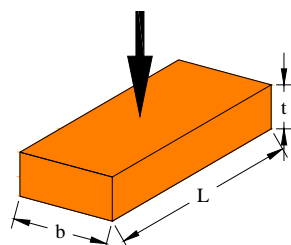
A.3 Propiedades de las piezas de mampostería

Las propiedades de las piezas de mampostería que se obtuvieron fueron: resistencia a la compresión, absorción inicial, contenido de humedad, módulo de ruptura, coeficiente de saturación y peso volumétrico. Los ensayos se realizaron de acuerdo a cada norma que determina el modo de prueba para cada ensaye, y que se describieron en el capítulo tres del presente estudio.

A.3.1 *Tabique de barro recocido*

Resistencia a la compresión del tabique

La resistencia a compresión del tabique se obtuvo de acuerdo a la norma NMX-C-036 vigente figura A.3. En la tabla A.14 se presentan los resultados de los ensayos realizados al tabique de barro recocido.



Tabique de barro recocido

Figura A.3. Resistencia a compresión del tabique

Tabla A.14. Resultados de ensayos a compresión en piezas de tabique de barro recocido

Pieza	P _{max.} kg	Área cm ²	σ kg/cm ²	Fecha de ensaye	Observaciones
1	27997.9	271.4	103	18/Mayo/05	Ensayes realizados para piezas del muro MCC-2
2	29866.8	266.8	112	18/Mayo/05	
3	31771.0	271.4	117	18/Mayo/05	
4	27789.5	266.8	104	18/Mayo/05	
5	33322.8	271.4	123	18/Mayo/05	
6	30249.4	266.8	113	18/Mayo/05	
7	30945.0	280.8	110	ND ¹	Ensayes realizados para piezas del muro MCC-1
8	29521.0	275.0	107	ND ¹	
9	30919.0	259.8	119	ND ¹	
10	31886.0	273.8	116	ND ¹	
11	34819.0	275.0	127	ND ¹	

¹ No se registró con exactitud la fecha del ensaye

Media = 113.8 kg/cm²
 Desviación estándar = 7.4 kg/cm²
 Coeficiente de variación 0.07
 Resistencia de diseño f_p^* = 61 kg/cm²

Absorción en 24 hrs. y coeficiente de saturación

Tabla A.15. Absorción y coeficiente de saturación del tabique de barro recocido

Pieza	b cm	t cm	L cm	Ws kg	W24 Kg	Ws kg	W5 kg	Absorción 24 h [%]	Coeficiente de Saturación
				23/03/06	24/03/07	27/03/08	27/03/08		
1	11.5	5.1	23.1	2.20	2.609	2.200	2.612	19	0.99
2	11.5	5.1	22.9	2.23	2.6	2.229	2.612	17	0.97
3	11.4	5.2	23.2	2.24	2.647	2.242	2.655	18	0.98
4	11.4	5.2	23.0	2.24	2.612	2.237	2.623	17	0.97
5	11.9	5.3	23.0	2.30	2.738	2.289	2.74	19	0.98

	Absorción a las 24 horas	Coeficiente de saturación
Media =	17.8	0.98
Desviación estándar =	1.1	0.01
Coeficiente de variación =	0.06	0.01

Absorción inicial

Tabla A.16. Absorción inicial en el tabique

Espécimen	LB cm2	Ws G	Wh g	Am g/min
A	279.7	2394.4	-	-
B	279.7	2308.0	2393.6	59.3
C	279.7	2242.5	2331.5	61.6
D	279.7	2317.6	2395.7	54.1
E	279.7	2393.6	2485.4	63.6
F	279.7	2331.5	2450.9	82.7

Media =	64.23	g/min
Desviación estándar =	10.90	g/min
Coeficiente de variación =	0.17	

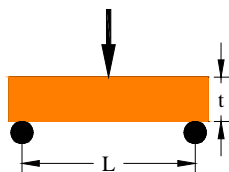
Módulo de ruptura

Figura A.4. Módulo de ruptura para el tabique de barro cocido

Tabla A.17. Módulo de ruptura del tabique de barro cocido

Pieza	b cm	t cm	L cm	P _{max} kg	M kg-cm	f_r kg/cm ²
1	11.9	5.4	18.5	2.255	41.0	189.6
2	11.8	5.5	18.4	2.271	154.1	708.9
3	11.8	5.1	18.6	2.230	86.81	403.7

Media = 9.6 kg/cm²
 Desviación estándar = 2.0 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.21

Peso volumétrico

Tabla A.18. Peso volumétrico del tabique de barro cocido

Pieza	b cm	t cm	L cm	P kg	γ ton/m ³
1	11.5	5.1	23.1	2.20	1.62
2	11.5	5.1	22.9	2.23	1.66
3	11.4	5.2	23.2	2.24	1.63
4	11.4	5.2	23.0	2.24	1.64
5	11.9	5.3	23.0	2.30	1.58
6	11.6	5.5	23.2	2.39	1.61
7	11.8	5.5	23.5	2.31	1.51
8	12.1	5.4	23.6	2.24	1.47
9	11.6	5.5	23.3	2.32	1.56
10	11.8	5.5	23.9	2.39	1.53
11	12.1	5.3	23.6	2.33	1.54

Media = 1.58 ton/m³
 Desviación estándar = 0.06 ton/m³
 Coeficiente de variación = 0.04

A.3.2 Bloque sólido de concreto ligero

Resistencia a la compresión del bloque sólido de concreto ligero

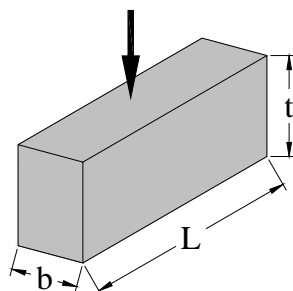


Figura A.5. Resistencia a compresión del bloque sólido de concreto ligero

Tabla A.19. Resultados de ensayos a compresión en piezas de bloques de concreto ligero

Pieza	P_{\max} Kg	Área neta cm^2	σ Kg/cm^2	Fecha de ensaye	Observaciones
1	22015.0	461.0	47.8	ND ¹	Ensayes realizados para piezas del muro MCC-1
2	24095.7	458.4	52.6	ND ¹	
3	25111.6	459.8	54.6	ND ¹	
4	24013.2	457.2	52.5	ND ¹	
5	13947.5	452.2	30.8	19 / Mayo / 05	Ensayes realizados para piezas del muro MCC-2
6	27020.0	452.0	59.8	19 / Mayo / 05	
7	24110.7	452.0	53.3	19 / Mayo / 05	
8	19554.0	452.0	43.3	19 / Mayo / 05	
9	16271.0	452.0	36.0	19 / Mayo / 05	

¹ No se registró con exactitud la fecha del ensaye

Media = 47.9 kg/cm^2
 Desviación estándar = 9.44 kg/cm^2
 Coeficiente de variación = 0.20
 Resistencia de diseño f_p^* = 27 kg/cm^2

Absorción en 24 hrs. y coeficiente de saturación

Tabla A.17. Absorción y coeficiente de saturación del tabique de barro recocido

Pieza	t cm	b cm	L cm	Ws kg	W24 kg	Ws Kg	W5 kg	Absorción 24 en %	Coeficiente de saturación
				23/03/06	24/03/07		05/04/08		
1	18.2	12.0	38.0	9.5	11.932	9.455	11.84	26	1.02
2	18.0	12.0	38.0	9.2	11.764	9.150	11.86	27	0.93
3	18.0	12.0	38.0	9.6	12.115	9.592	12.33	26	0.90
4	18.0	12.0	38.0	9.4	11.607	9.335	11.37	24	1.09
5	18.0	12.0	38.0	9.9	12.293	9.66	12.086	24	0.97

	Absorción en 24 horas	Coeficiente de saturación
Media =	25.2	0.98
Desviación estándar =	1.6	0.07
Coeficiente de variación	0.06	0.08

Absorción inicial

Tabla A.18. Absorción inicial en los bloques

Espécimen	LB cm ²	Ws G	Wh g	Am g/min
1	467.4	8809.3	8885.5	31.6
2	467.4	9015.8	9056.3	16.8
3	467.4	8133.1	8254.1	50.1
4	467.4	8885.5	8949.3	26.4
5	467.4	9056.3	9115.1	24.3
6	467.4	8254.1	8368.1	47.2

Media =	32.7
Desviación estándar =	13.2
Coeficiente de variación	0.40

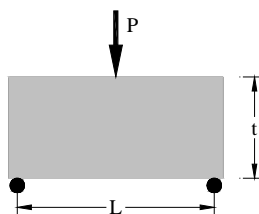
Módulo de ruptura

Figura A.6 Prueba a tensión del bloque sólido de concreto ligero

Tabla A.19. Módulo de ruptura de los bloques

Pieza	b cm	t cm	L cm	W kg	Pmax kg	M kg-cm	f_r kg/cm ²
1	12.2	18.2	38.1	9.0	794.9	7571.0	11.2
2	12.1	18.2	38.2	9.5	512.7	4895.9	7.3
3	12.1	18.3	38.1	9.0	727.2	6926.3	10.3

Media = 9.6 kg/cm²
 Desviación estándar = 2.0 kg/cm²
 Coeficiente de variación = 0.21

Peso volumétrico

Tabla A.17. Peso volumétrico del bloque

Pieza	t cm	b cm	L cm	Volumen total cm ³	Volumen neto cm ³	P kg	g ton/m ³
1	18.6	12.3	38.0	8672.4	8535.2	8.81	1.03
2	18.7	12.3	38.0	8747.3	8610.0	9.02	1.05
3	18.6	12.3	37.9	8689.5	8552.3	8.13	0.95
4	18.5	12.3	38.0	8670.3	8533.0	8.89	1.04
5	18.4	12.5	38.0	8723.8	8586.5	9.06	1.05
6	18.3	12.2	37.9	8475.4	8338.1	8.25	0.99
7	18.2	12.0	38.0	8299.2	8161.9	9.49	1.16
8	18.0	12.0	38.0	8208.0	8070.7	9.25	1.15
9	18.0	12.0	38.0	8208.0	8070.7	9.64	1.19
10	18.0	12.0	38.0	8208.0	8070.7	9.39	1.16
11	18.0	12.0	38.0	8208.0	8070.7	9.94	1.23

Media = 1.09 ton/m³
 Desviación estándar = 0.09 ton/m³
 Coeficiente de variación = 0.08

A.4 Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de la mampostería

La resistencia de diseño de la mampostería y el módulo de elasticidad se determinó de ensayos de pilas de mampostería (figura A.7). Estos ensayos se dividieron en dos etapas, las cuales se distinguieron por el arreglo de la mampostería. Los resultados se describen a continuación.

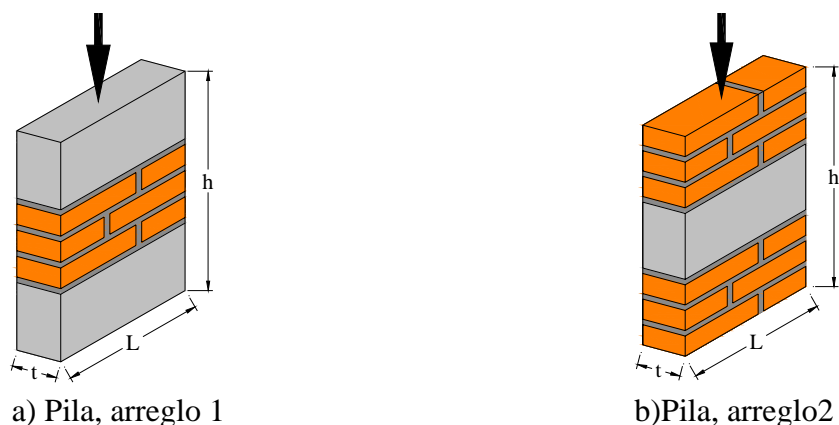


Figura A.7. Resistencia a compresión de la mampostería

A.4.1 Pilas arreglo 1 (figura A.7a)

Ensayo:	Resistencia a compresión
Espécimen:	Pilas arreglo 1
Fecha de fabricación:	15 de junio del 2004
Fecha de prueba:	Noviembre del 2004

Tabla A.20. Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de la mampostería combinada arreglo 1

Pila	P_{\max} ton	Área cm^2	σ_{\max} kg/cm^2	E kg/m^2
Pila de prueba	12699	456	29.06	15124.7
Pila 1	12204	456	27.93	10996.7
Pila 2	16407	456	37.54	12503.3
Pila 3	13176	456	30.15	9361.2
Pila 4	14877	456	34.04	17655.1
Pila 6	17586	456	40.24	14806.7
Pila 7	13356	456	30.56	9772.9
Pila 8	11682	456	26.73	11491.7

Resistencia a compresión

Media =	32.0	kg/cm ²
Desviación estándar =	4.80	kg/cm ²
Coefficiente de variación =	0.15	
Resistencia de diseño [f_m^*] =	23.2	kg/cm ²

Módulo de elasticidad

Media (E_m) =	12714.0	kg/cm ² ($E_m = 545.7.1 f_m^*$)
Desviación estándar =	2902.82	kg/cm ²
Coefficiente de variación =	0.23	

A.4.2 Pilas arreglo 2 (figura A.7b)

Ensayo:	Resistencia a compresión
Espécimen:	Pilas arreglo 2
Fecha de fabricación:	4 y 16 de Febrero del 2006
Fecha de prueba:	22 Marzo del 2006

Tabla A.20. Resistencia a compresión y módulo de elasticidad de la mampostería combinada arreglo 2

Pila	Peso kg	e cm	h cm	L cm	Área cm ²	P _{max} Ton	σ kg/cm ²	E kg/cm ²
1	36.0	11.7	56.8	38.3	448	10.15	22.6	8101.5
2	36.6	11.7	57.2	38.3	448	9.939	22.2	18108.1
3	37.4	11.7	57.2	38.3	448	15.82	35.3	9193.1
4	36.6	11.7	56.3	38.3	448	10.29	23.0	12171.5
5	36.6	11.7	57.5	38.3	448	11.62	25.9	13057.5
6	37.8	11.7	57.4	38.3	448	13.44	30.0	10826.5
7	37.0	11.7	57.5	38.3	448	12.65	28.2	13021.8
8	36.6	11.7	56.8	38.3	448	10.09	22.5	13145.8
9	37.4	11.7	57.5	38.3	448	13.20	29.5	10929.0
10	37.8	11.7	57.3	38.3	448	10.41	23.2	10888.0

Resistencia a compresión

Media =	26.25	kg/cm ²
Desviación estándar =	4.4	kg/cm ²
Coefficiente de variación =	0.17	
Resistencia de diseño [f_m^*] =	18.5	kg/cm ²

Módulo de elasticidad

Media (E_m) = 11944.3 kg/cm² ($E_m = 645.64 f_m^*$)

Desviación estándar = 2741.0 kg/cm²

Coefficiente de variación = 0.23

A.5 Resistencia a compresión diagonal de la mampostería

La resistencia de diseño a cortante de la mampostería y el módulo de cortante se determinaron de ensayos a muretes de mampostería (figura A.8). Estos ensayos se dividieron en dos etapas, las cuales se distinguieron por el arreglo de la mampostería

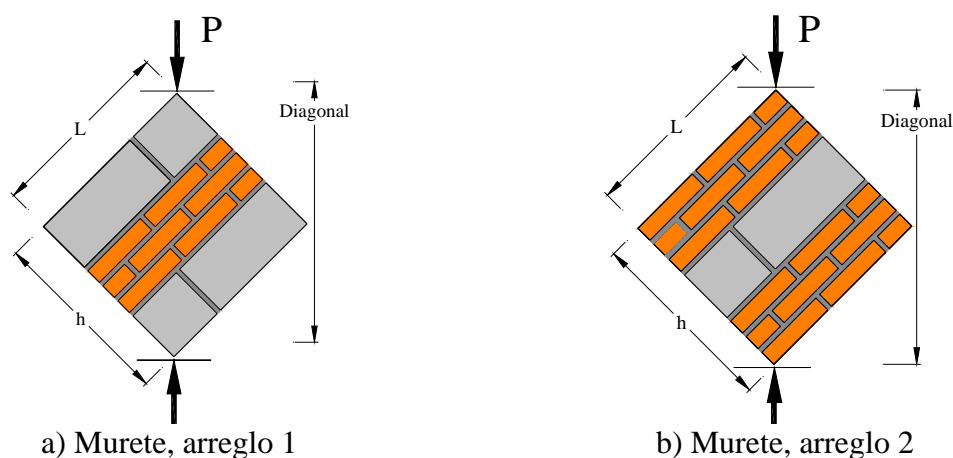


Figura A.8 Resistencia a compresión diagonal de los muretes

A.5.1 Muretes arreglo 1

Tabla A.21. Resistencia a compresión diagonal y módulo de rigidez a cortante de la mampostería combinada, arreglo 1

Murete	L cm	h cm	Espesor cm	Diagonal cm	Área cm ²	P _{max} kg	τ kg/cm ²	G _m kg/cm ²
M _{prueba}	58	58	12	82	984	2208.00	2.24	5,287.2
M 1	58	58	12	82	984	4968.60	5.05	7795.5
M2	58	58	12	82	984	1800.00	1.83	2164.8
M3	58	58	12	82	984	4694.20	4.77	6493.5
M 4	58	58	12	82	984	4347.00	4.42	4505.8
M 5b	58	58	12	82	984	1411.20	1.43	3538.9
M 6	58	58	12	82	984	1822.80	1.85	3379.9
M 7	58	58	12	82	984	1205.40	1.23	1930.3
M 8	58	58	12	82	984	2753.80	2.80	4935.2
M 9	58	58	12	82	984	2812.60	2.86	3810.2

Resistencia a cortante

Media =	2.8	kg/m ²
Desviación estándar =	1.4	kg/cm ²
Coefficiente de variación =	0.50	
Resistencia de diseño [ν^*_m]=	1.27	kg/cm ²

Módulo de rigidez a cortante

Media [G_m] =	4384.1	kg/m ² ($G_m = 0.34 E_m$)
Desviación estándar =	1832.4	kg/cm ²
Coefficiente de variación =	0.42	

A.5.2 Muretes arreglo 2

Tabla A.22. Resistencia a compresión diagonal y módulo de rigidez a cortante de la mampostería combinada, arreglo 2

Murete	L cm	h cm	Espesor cm	Diagonal cm	Área cm ²	P _{max} Ton	τ kg/cm ²	G _m Kg/cm2
M 1	58.4	57.2	11.7	81.2	950.0	4,370.0	4.60	4345.0
M2	58.0	57.3	11.7	81.0	947.7	3,422.4	3.61	4687.4
M3	58.5	57.2	11.7	81.5	953.6	3,946.8	4.14	3337.4
M 4	59.3	57.1	11.7	81.9	958.2	3,726.0	3.89	3018.7
M 5	59.0	57.2	11.7	81.0	947.7	3,910.0	4.13	4846.1
M 6	58.7	57.0	11.7	81.0	947.7	4,646.0	4.90	4222.0
M 7	57.5	56.9	11.7	81.3	951.2	2,585.2	2.72	2940.3
M 8	59.5	56.8	11.7	82.0	959.4	2,907.2	3.03	3869.5
M 9	58.0	57.0	11.7	81.2	950.0	3,514.4	3.70	4793.9

Resistencia a cortante

Media =	3.86	kg/m ²
Desviación estándar =	0.69	kg/cm ²
Coefficiente de variación =	0.18	
Resistencia de diseño [ν^*_m]=	2.57	kg/cm ²

Módulo de rigidez a cortante

Media [G_m] = 4006.7 Kg/m² ($G_m = 0.34 E_m$)
Desviación estándar = 752.37 Kg/cm²
Coeficiente de variación = 0.19

APÉNDICE B

GRÁFICAS DE ENSAYES A PILAS Y MURETES

En este apéndice se presentan las gráficas obtenidas de los ensayos a pilas y muretes de mampostería combinada realizados en el presente estudio.

A.1 Pilas de mampostería

A.1.1 Pilas arreglo 1

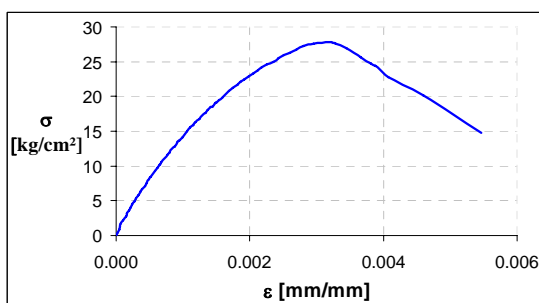


Figura A.1. Pila de prueba

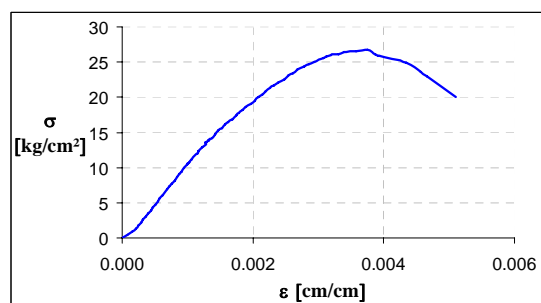


Figura A.2. Pila 1

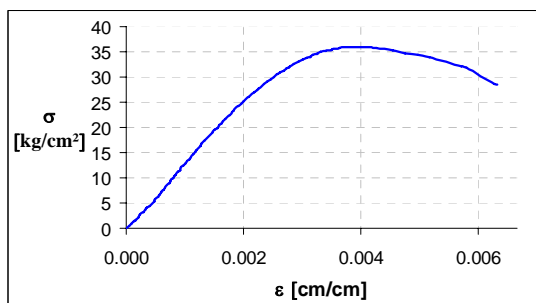


Figura A.3. Pila 2

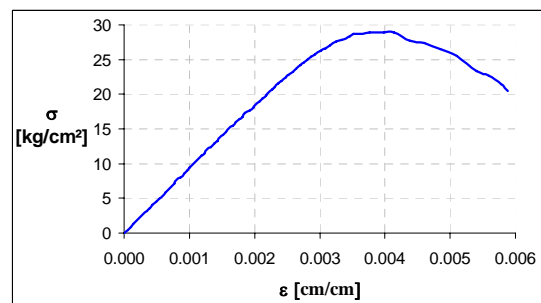


Figura A.4. Pila 3

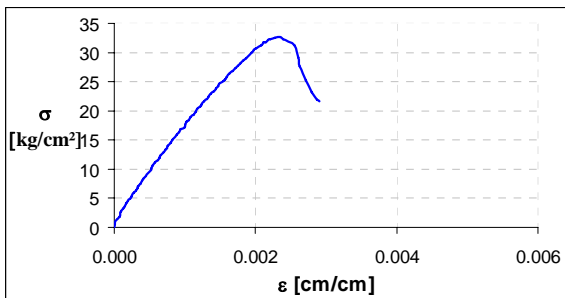


Figura A.5. Pila 4

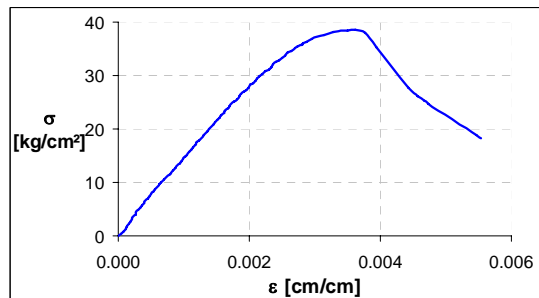


Figura A.6. Pila 6

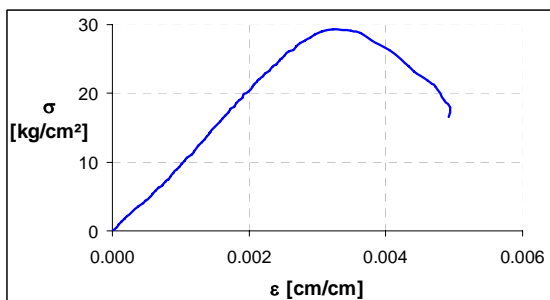


Figura A.7. Pila 7

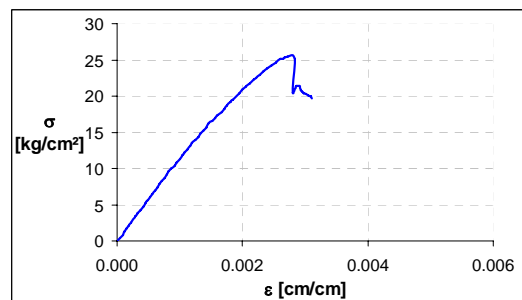


Figura A.8. Pila 8

A.1.2 Pilas arreglo 2

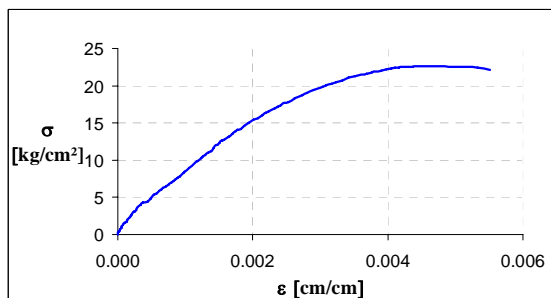


Figura A.9. Pila 1

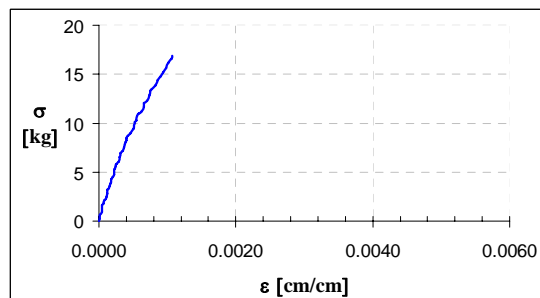


Figura A.10. Pila 2

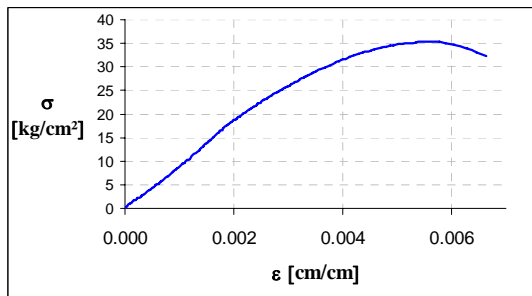


Figura A.11. Pila 3

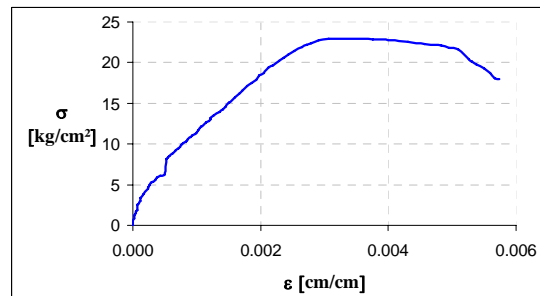


Figura A.12. Pila 4

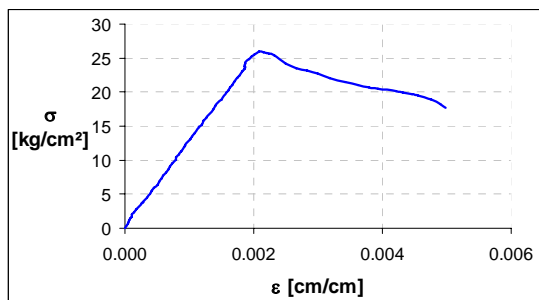


Figura A.13. Pila 5

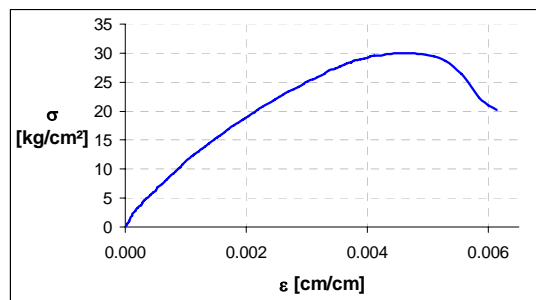


Figura A.14. Pila 6

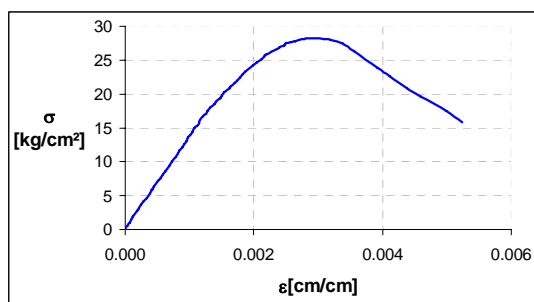


Figura A.15. Pila 7

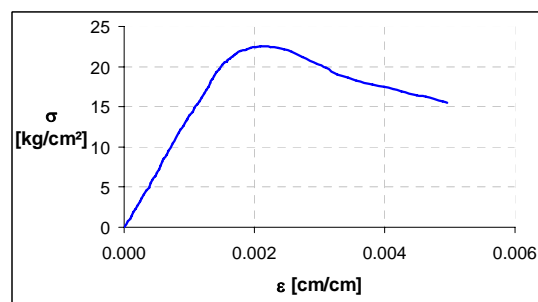


Figura A.16. Pila 8

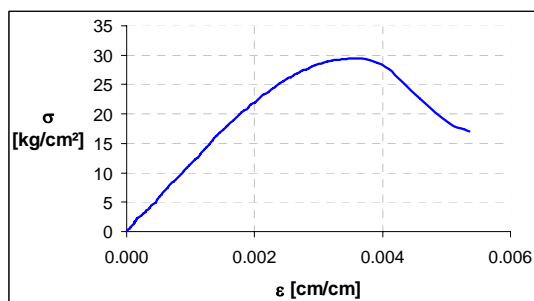


Figura A.17. Pila 9

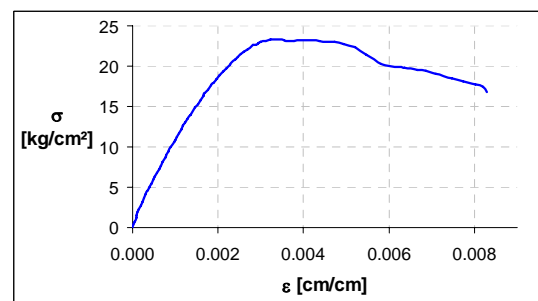


Figura A.18. Pila 10

A.2 Muretes de mampostería combinada

A.2.1 Gráficas correspondientes a los muretes arreglo 1

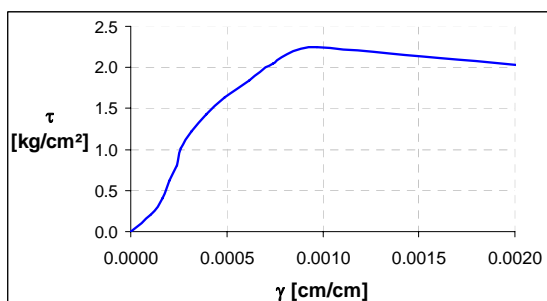


Figura A.19. Murete prueba

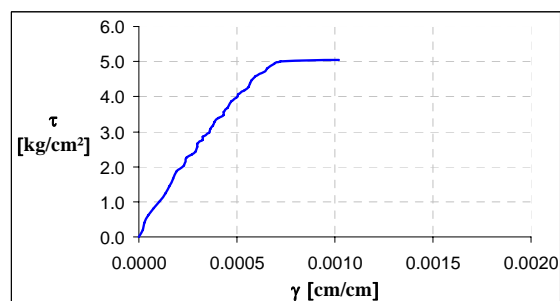


Figura A.20. Murete 1

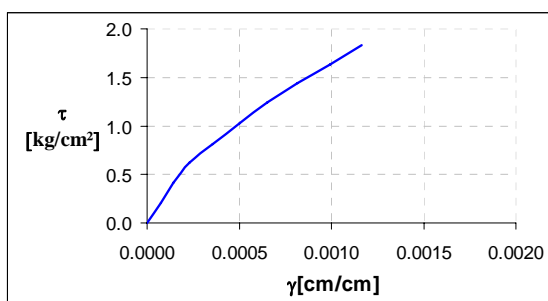


Figura A.21. Murete 2

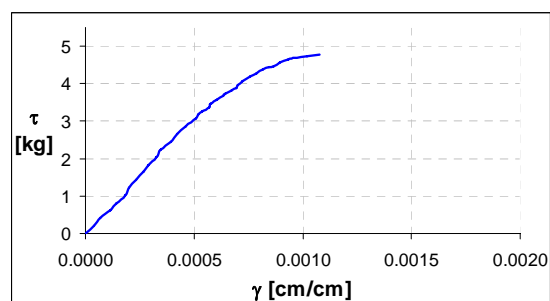


Figura A.22. Murete 3

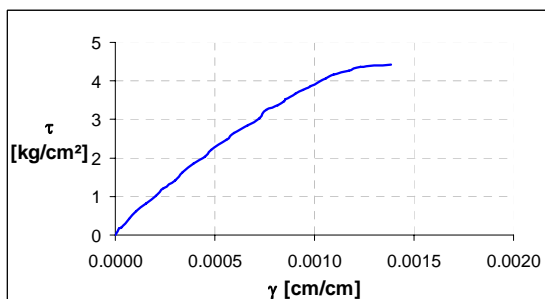


Figura A.23. Murete 4

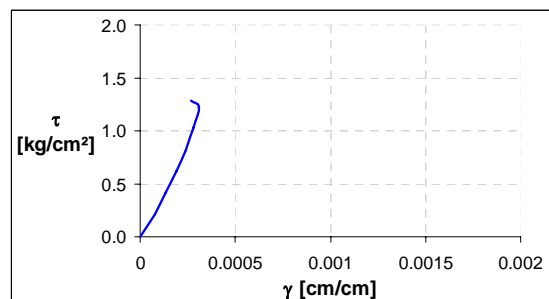


Figura A.24. Murete 5b

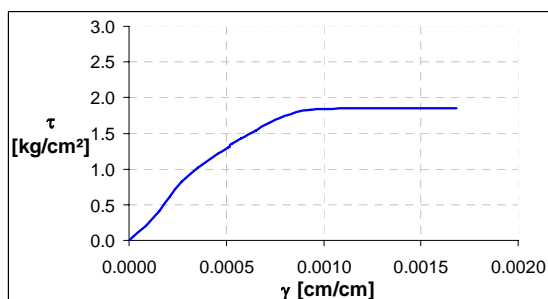


Figura A.25. Murete 6

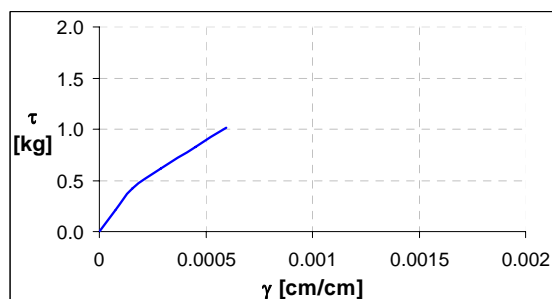


Figura A.26. Murete 7

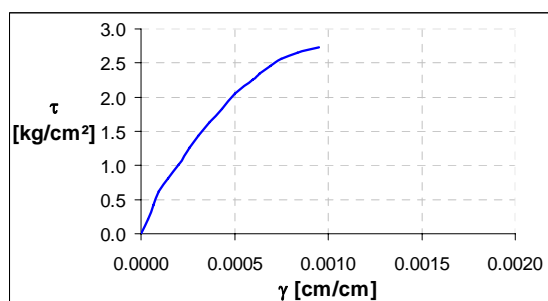


Figura A.27. Murete 8

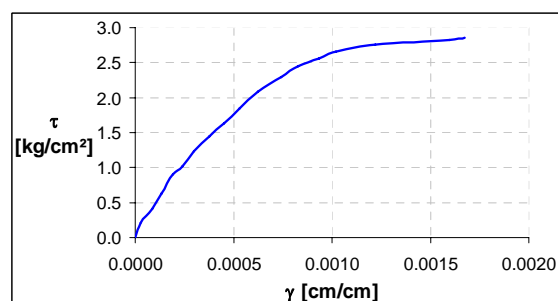


Figura A.28. Murete 9

A.2.2 Muretes arreglo 2

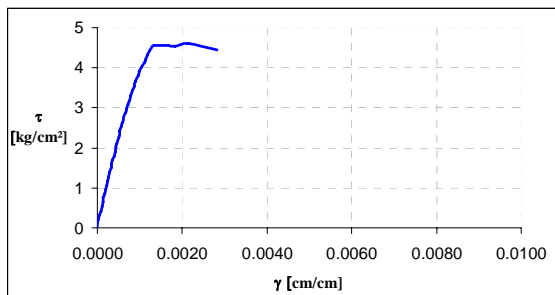


Figura A.29. Murete 1

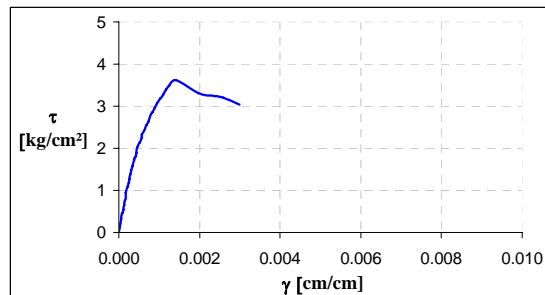


Figura A.30. Murete 2

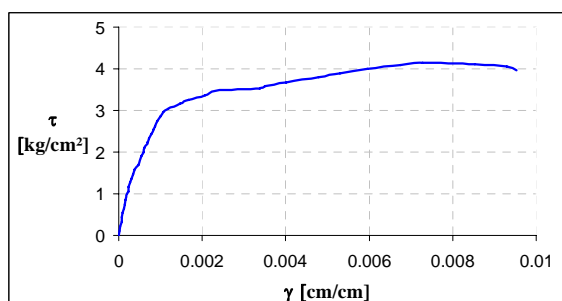


Figura A.31. Murete 3

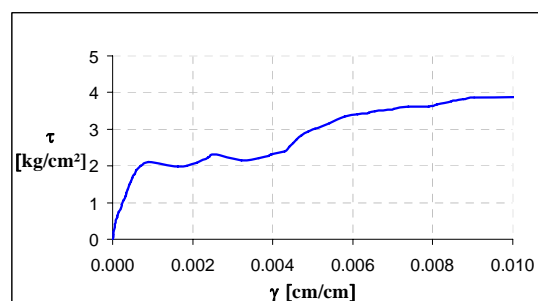


Figura A.32. Murete 4

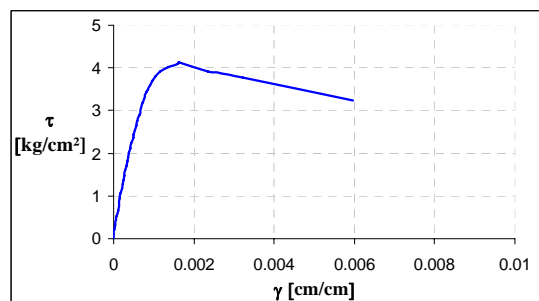


Figura A.33. Murete 5

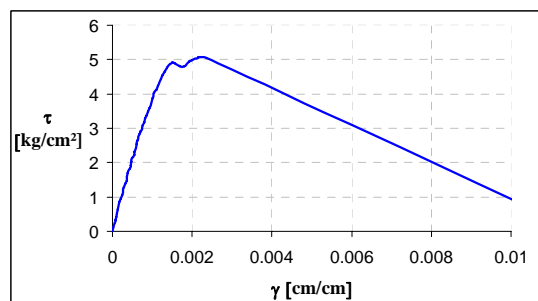


Figura A.34. Murete 6

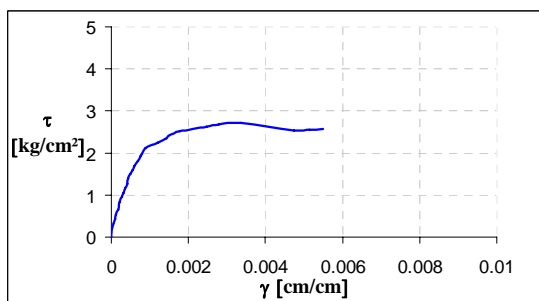


Figura A.35. Murete 7

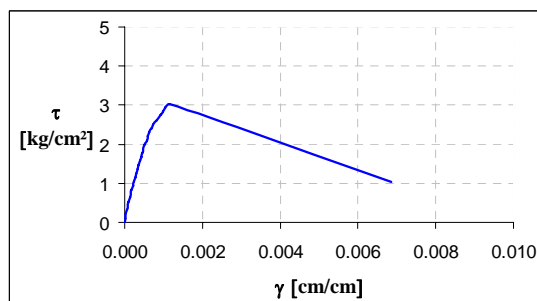


Figura A.36. Murete 8

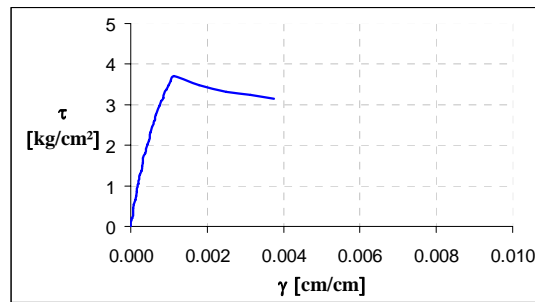


Figura A.37. Murete 9

APÉNDICE C

CÁLCULOS DE ENERGÍA DE DEFORMACIÓN DE LAS CURVAS AJUSTADAS DE PILAS Y MURETES

Se presentan los cálculos realizados, para determinar los módulos de resiliencia y tenacidad de las pilas y muretes de mampostería combinada.

Se ajustaron las gráficas obtenidas experimentalmente, obteniendo una ecuación de la curva, la que se integraba en el intervalo elástico, para obtener la resiliencia de la probeta y se integraba a lo largo de toda la curva para la obtención de la tenacidad.

Para el ajuste de curvas, fue necesario segmentar las curvas correspondientes a los muretes, ya que, en la mayoría de los casos el intervalo inelástico era considerable, lo que el ajuste de una curva cúbica no era suficiente para representar lo mas cercana posible.

A.1 Energía de deformación de las pilas, arreglo 1

Pila de prueba

Ecuación de la curva: $y = 35842635 \cdot x^3 - 2855000x^2 + 16953.533 \cdot x + 0.318$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00133} 35842635 \cdot x^3 - 2855000x^2 + 16953.533 \cdot x + 0.318 \, dx$$

$$U_r = 0.01321 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00546} 35842635 \cdot x^3 - 2855000x^2 + 16953.533 \cdot x + 0.318 \, dx$$

$$U_t = 0.1075 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

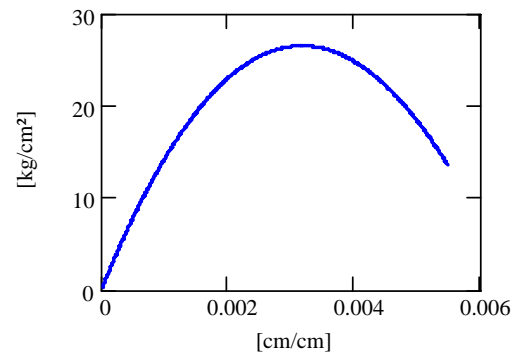


Figura C.1. Curva ajustada, pila de prueba

Pila 1

Ecuación de la curva: $y = -221177967.36 \cdot x^3 - 427888.4x^2 + 12001.96 \cdot x - 0.97$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00189} -221177967.36 \cdot x^3 - 427888.4x^2 + 12001.96 \cdot x - 0.97 \, dx$$

$$U_r = 0.01793 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00511} -221177967.36 \cdot x^3 - 427888.4x^2 + 12001.96 \cdot x - 0.97 \, dx$$

$$U_t = 0.09501 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

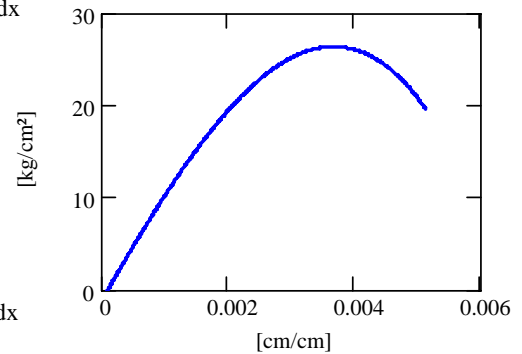


Figura C.2. Curva ajustada, pila 1

Pila 2

Ecuación de la curva: $y = -57811576.38 \cdot x^3 - 1330706.66x^2 + 15738.54 \cdot x - 1.73$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00252} -57811576.38 \cdot x^3 - 1330706.66x^2 + 15738.54 \cdot x - 1.73 \, dx$$

$$U_r = 0.03793 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00664} -57811576.38 \cdot x^3 - 1330706.66x^2 + 15738.54 \cdot x - 1.73 \, dx$$

$$U_t = 0.17751 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

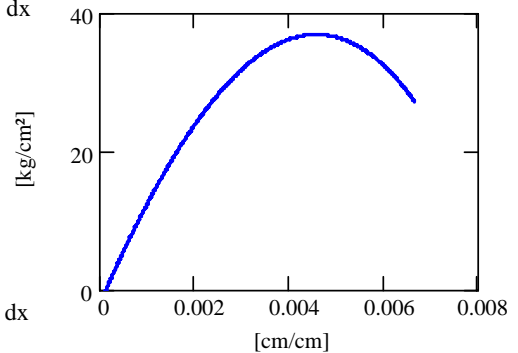


Figura C.3. Curva ajustada, pila 2

Pila 3

Ecuación de la curva: $y = -276666476.62 \cdot x^3 + 612057.78 \cdot x^2 + 9286.81 \cdot x - 0.20$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00242} -276666476.62 \cdot x^3 + 612057.78 \cdot x^2 + 9286.81 \cdot x - 0.20 \, dx$$

$$U_r = 0.02723 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00588} -276666476.62 \cdot x^3 + 612057.78 \cdot x^2 + 9286.81 \cdot x - 0.20 \, dx$$

$$U_t = 0.11816 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

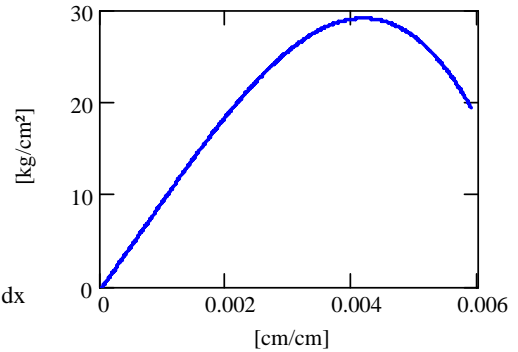


Figura C.4. Curva ajustada, pila 3

Pila 4

Ecuación de la curva: $y = -3146797355.42 \cdot x^3 + 7716031.41 \cdot x^2 + 11406.80 \cdot x + 1.74$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00163} -3146797355.42 \cdot x^3 + 7716031.41 \cdot x^2 + 11406.80 \cdot x + 1.74 \, dx$$

$$U_r = 0.02357 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00290} -3146797355.42 \cdot x^3 + 7716031.41 \cdot x^2 + 11406.80 \cdot x + 1.74 \, dx$$

$$U_t = 0.0601 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

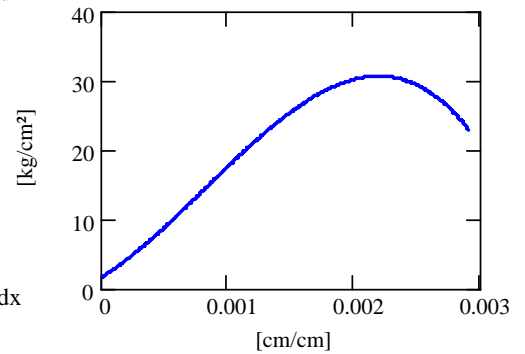


Figura C.5. Curva ajustada, pila 4

Pila 6

Ecuación de la curva: $y = -439020811.45 \cdot x^3 + 14507.62 \cdot x^2 + 16001.19 \cdot x - 0.49$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00225} -439020811.45 \cdot x^3 + 14507.62 \cdot x^2 + 16001.19 \cdot x - 0.49 \, dx$$

$$U_r = 0.03664 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00554} -439020811.45 \cdot x^3 + 14507.62 \cdot x^2 + 16001.19 \cdot x - 0.49 \, dx$$

$$U_t = 0.14027 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

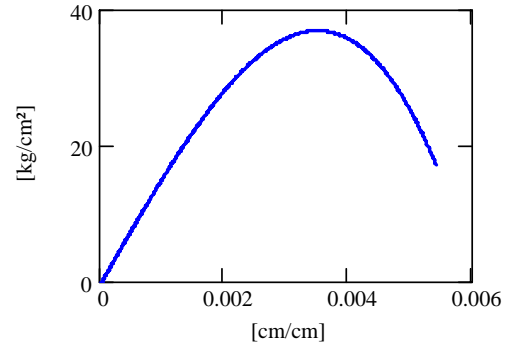


Figura C.6. Curva ajustada, pila 6

Pila 7

Ecuación de la curva: $y = -750024937.79 \cdot x^3 + 2867347.01 \cdot x^2 + 7484.16 \cdot x + 0.08$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00244} -750024937.79 \cdot x^3 + 2867347.01 \cdot x^2 + 7484.16 \cdot x + 0.08 \, dx$$

$$U_r = 0.02971 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00494} -750024937.79 \cdot x^3 + 2867347.01 \cdot x^2 + 7484.16 \cdot x + 0.08 \, dx$$

$$U_t = 0.09527 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

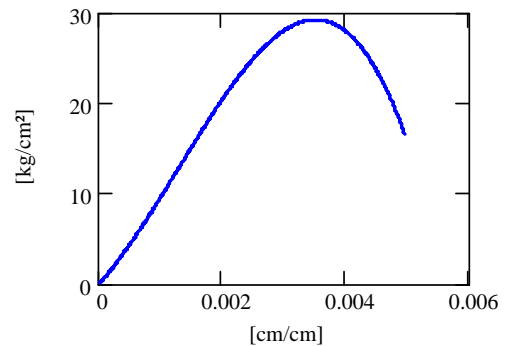


Figura C.7. Curva ajustada, pila 7

Pila 8

Ecuación de la curva: $y = -750024937.79 \cdot x^3 + 2867347.01 \cdot x^2 + 7484.16 \cdot x + 0.08$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00181} -750024937.79 \cdot x^3 + 2867347.01 \cdot x^2 + 7484.16 \cdot x + 0.08 \, dx$$

$$U_r = 0.01606 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00315} -750024937.79 \cdot x^3 + 2867347.01 \cdot x^2 + 7484.16 \cdot x + 0.08 \, dx$$

$$U_t = 0.0488 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

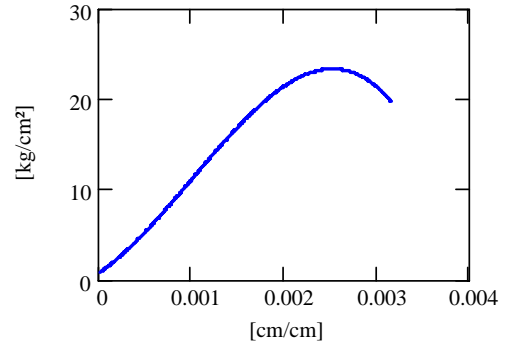


Figura C.8. Curva ajustada, pila 8

Resumen de resultados de las pilas, arreglo 1

Tabla C.1. Resultados de energía de deformación de las pilas correspondientes al arreglo 1

Pilas de mampostería combinada	Módulo de resiliencia U_r	Módulo de tenacidad U_t
Arreglo 1		
Pila de prueba	kg-cm/cm ³	kg-cm/cm ³
Pila 1	0.01321	0.10750
Pila 2	0.03793	0.17751
Pila 3	0.02723	0.11816
Pila 4	0.02357	0.06010
Pila 6	0.03664	0.14027
Pila 7	0.02971	0.09527
Pila 8	0.01606	0.04880

Módulo de resiliencia (U_r)¹ = 0.025 kg-cm/cm³

Módulo de tenacidad (U_t)¹ = 0.105 kg-cm/cm³

¹Valores medios

A.2 Energía de deformación de las pilas, arreglo 2

Pila 1

Ecuación de la curva: $y = -16595869.65x^3 - 854122.73x^2 + 9104.11 \cdot x + 0.55$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00207} -16595869.65x^3 - 854122.73x^2 + 9104.11 \cdot x + 0.55 \, dx$$

$$U_r = 0.01804 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00573} -16595869.65x^3 - 854122.73x^2 + 9104.11 \cdot x + 0.55 \, dx$$

$$U_t = 0.09457 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

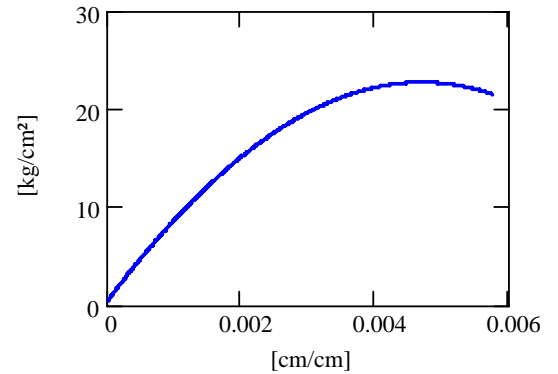


Figura C.9. Curva ajustada, pila 1

Pila 2

Ecuación de la curva: $y = -6665495.13x^2 + 22258.79 \cdot x + 0.28$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00050} -6665495.13x^2 + 22258.79 \cdot x + 0.28 \, dx$$

$$U_r = 0.00264 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00107} -6665495.13x^2 + 22258.79 \cdot x + 0.28 \, dx$$

$$U_t = 0.01032 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

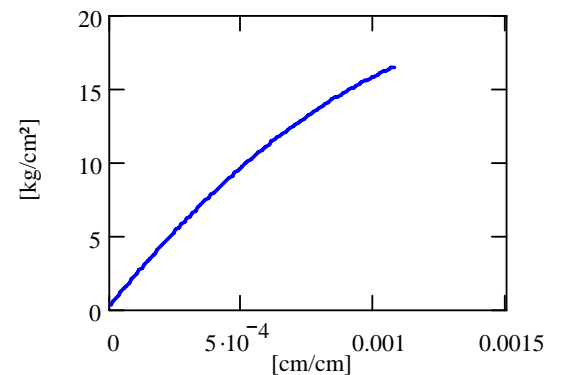


Figura C.10. Curva ajustada, pila 2

Pila 3

Ecuación de la curva: $y = -109597616.83 \cdot x^3 + 138.39x^2 + 9771.44 \cdot x - 0.37$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00282} -109597616.83 \cdot x^3 + 138.39x^2 + 9771.44 \cdot x - 0.37 \, dx$$

$$U_r = 0.03608 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00664} -109597616.83 \cdot x^3 + 138.39x^2 + 9771.44 \cdot x - 0.37 \, dx$$

$$U_t = 0.1597 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

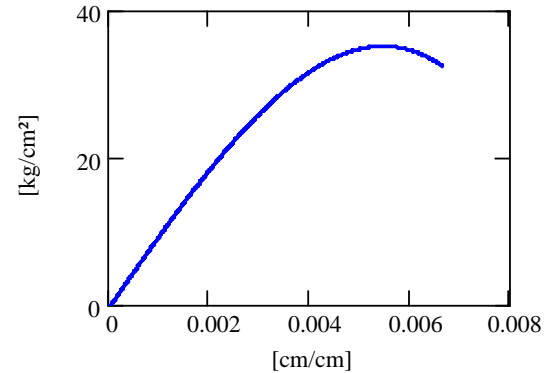


Figura C.11. Curva ajustada, pila 3

Pila 4

Ecuación de la curva: $y = 32453505.23 \cdot x^3 - 1778522.11 \cdot x^2 + 12057.94 \cdot x + 1.35$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00242} 32453505.23 \cdot x^3 - 1778522.11 \cdot x^2 + 12057.94 \cdot x + 1.35 \, dx$$

$$U_r = 0.03045 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00574} 32453505.23 \cdot x^3 - 1778522.11 \cdot x^2 + 12057.94 \cdot x + 1.35 \, dx$$

$$U_t = 0.10308 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

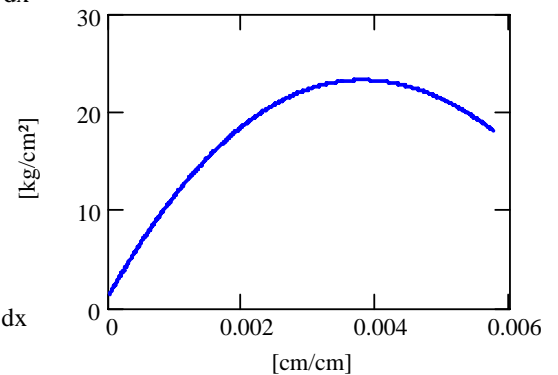


Figura C.12. Curva ajustada, pila 4

Pila 5

Ecuación de la curva: $y = 12587x + 0.2595$

Intervalo elástico

$$y = 399747.53x^2 - 5426.72x + 35.53$$

Intervalo inelástico

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00208} 12587x + 0.2595 \, dx$$

$$U_r = 0.02777 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

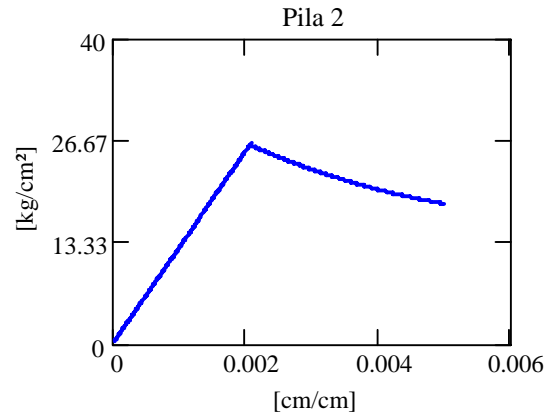


Figura C.13. Curva ajustada, pila 5

$$U_t := \int_0^{0.00208} 12587x + 0.2595 \, dx + \int_{0.00208}^{0.00499} 399747.53 \cdot x^2 - 5426.72 \cdot x + 35.53 \, dx$$

$$U_t = 0.09069 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Pila 6

Ecuación de la curva: $y = -186957420.21 \cdot x^3 + 141538.10 \cdot x^2 + 9387.30 \cdot x + 1.31$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00193} -186957420.21 \cdot x^3 + 141538.10 \cdot x^2 + 9387.30 \cdot x + 1.31 \, dx$$

$$U_r = 0.0197 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00613} -186957420.21 \cdot x^3 + 141538.10 \cdot x^2 + 9387.30 \cdot x + 1.31 \, dx$$

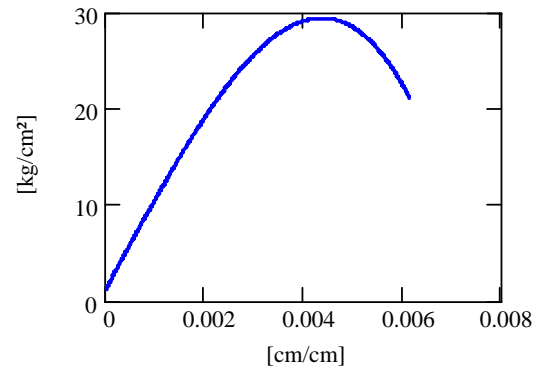


Figura C.14. Curva ajustada, pila 6

$$U_t = 0.12927 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Pila 7

Ecuación de la curva: $y = 162225832859.7 \cdot x^4 - 1713532516x^3 + 2970508.2 \cdot x^2 + 11330 \cdot x + 0.35$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00244} 162225832860 \cdot x^4 - 1713532516x^3 + 2970508 \cdot x^2 + 11330 \cdot x + 0.4 \, dx$$

$$U_r = 0.03671 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00550} 162225832860 \cdot x^4 - 1713532516x^3 + 2970508 \cdot x^2 + 11330 \cdot x + 0.4 \, dx$$

$$U_t = 0.1096 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

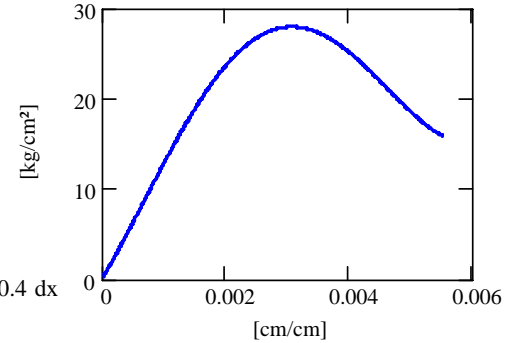


Figura C.15. Curva ajustada, pila 7

Pila 8

Ecuación de la curva: $y = 525633522.96 \cdot x^3 - 6412014.33 \cdot x^2 + 22468.19 \cdot x - 2.36$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00167} 525633522.96 \cdot x^3 - 6412014.33 \cdot x^2 + 22468.19 \cdot x - 2.36 \, dx$$

$$U_r = 0.01846 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00520} 525633522.96 \cdot x^3 - 6412014.33 \cdot x^2 + 22468.19 \cdot x - 2.36 \, dx$$

$$U_t = 0.08705 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

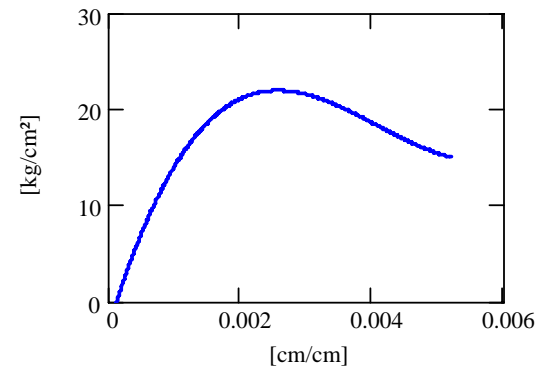


Figura C.16. Curva ajustada, pila 8

Pila 9

Ecuación de la curva: $y = -318037989.18 \cdot x^3 - 252490.36 \cdot x^2 + 11364.10 \cdot x - 0.08$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00167} -318037989.18 \cdot x^3 - 252490.36 \cdot x^2 + 11364.10 \cdot x - 0.08 \, dx$$

$$U_r = 0.0147 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00564} -318037989.18 \cdot x^3 - 252490.36 \cdot x^2 + 11364.10 \cdot x - 0.08 \, dx$$

$$U_t = 0.08474 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

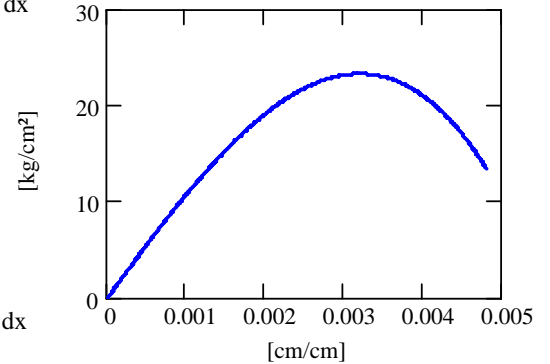


Figura C.17. Curva ajustada, pila 9

Pila 10

Ecuación de la curva: $y = 136874838.8 \cdot x^3 - 2566517.6x^2 + 13972.1 \cdot x - 0.15$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00176} 136874838.8 \cdot x^3 - 2566517.6x^2 + 13972.1 \cdot x - 0.15 \, dx$$

$$U_r = 0.01704 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00829} 136874838.8 \cdot x^3 - 2566517.6x^2 + 13972.1 \cdot x - 0.15 \, dx$$

$$U_t = 0.15308 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

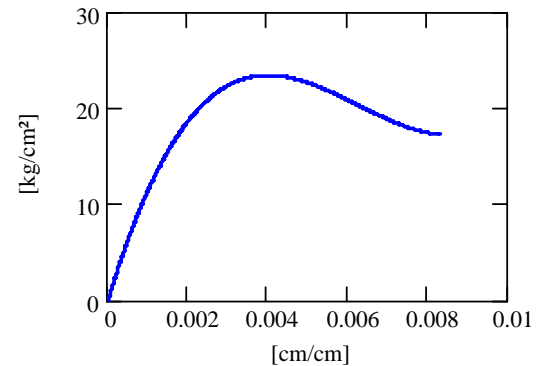


Figura C.18. Curva ajustada, pila 10

Resumen de resultados de las pilas, arreglo 2

Tabla C.1. Resultados de energía de deformación de las pilas correspondientes al arreglo 2

Pilas de mampostería combinada Arreglo 2	Módulo de resiliencia U_r kg-cm/cm ³	Módulo de tenacidad U_t kg-cm/cm ³
Pila 1	0.01804	0.09457
Pila 2	0.00264	0.01032
Pila 3	0.03608	0.15970
Pila 4	0.03045	0.10308
Pila 5	0.02777	0.09069
Pila 6	0.01970	0.12927
Pila 7	0.03671	0.10960
Pila 8	0.01846	0.08705
Pila 9	0.01470	0.08474
Pila 10	0.01704	0.15308

Módulo de resiliencia (U_r) = 0.022 ¹ kg-cm/cm³Módulo de tenacidad (U_t) = 0.102 ¹ kg-cm/cm³¹Valores medios**A.3 Energía de deformación de muretes: arreglo 1****Murete de prueba**Ecuación de la curva: $y = -894056200.9 \cdot x^3 - 1055272.4x^2 + 4271.84 \cdot x - 0.12$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.0003} -894056200.9 \cdot x^3 - 1055272.4x^2 + 4271.84 \cdot x - 0.12 \, dx$$

$$U_r = 0.00014 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.0010} -894056200.9 \cdot x^3 - 1055272.4x^2 + 4271.84 \cdot x - 0.12 \, dx$$

$$U_t = 0.00144 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

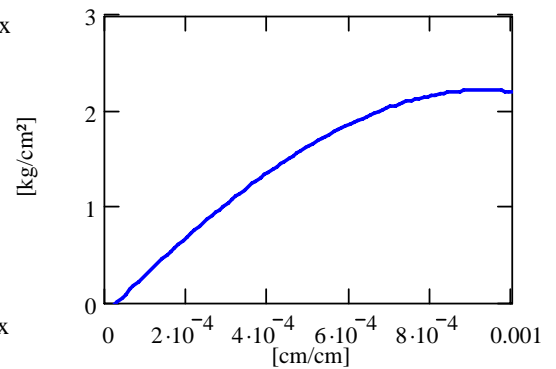


Figura C.19. Curva ajustada, murete de prueba

Murete 1

Ecuación de la curva: $y = -5386280x^2 + 10720.67 \cdot x - 0.04$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00036} -5386280x^2 + 10720.67 \cdot x - 0.04 \, dx$$

$$U_r = 0.0006 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00102} -5386280x^2 + 10720.67 \cdot x - 0.04 \, dx$$

$$U_t = 0.00363 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

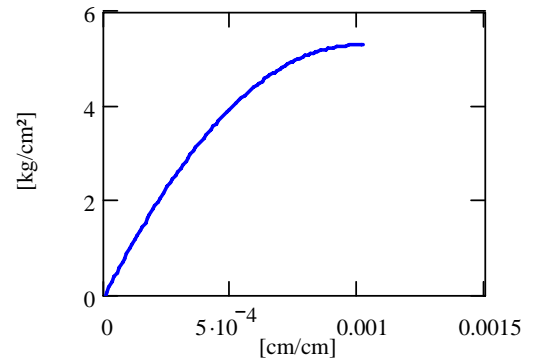


Figura C.20. Curva ajustada, murete 1

Murete 2

Ecuación de la curva: $y = -710508.6x^2 + 2321.4 \cdot x - 0.05$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00036} -710508.6x^2 + 2321.4 \cdot x - 0.05 \, dx$$

$$U_r = 0.00012 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00116} -710508.6x^2 + 2321.4 \cdot x - 0.05 \, dx$$

$$U_t = 0.00113 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

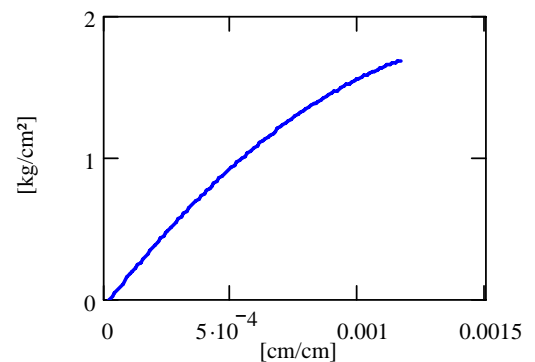


Figura C.21. Curva ajustada, murete 2

Murete 3

Ecuación de la curva: $y = -3062481x^2 + 8029.4 \cdot x - 0.20$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00029} -3062481x^2 + 8029.4 \cdot x - 0.20 \, dx$$

$$U_r = 0.00025 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00108} -3062481x^2 + 8029.4 \cdot x - 0.20 \, dx$$

$$U_t = 0.00318 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

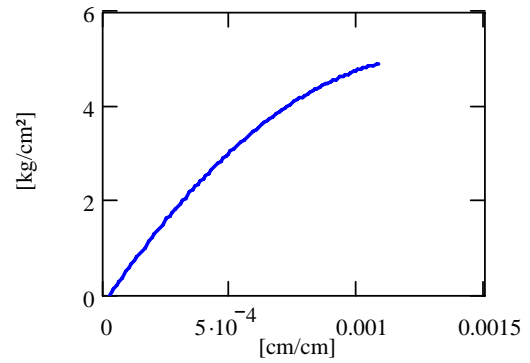


Figura C.22. Curva ajustada, murete 3

Murete 4

Ecuación de la curva: $y = -1434961.4x^2 + 5271.9 \cdot x + 0.03$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.0004} -1434961.4x^2 + 5271.9 \cdot x + 0.03 \, dx$$

$$U_r = 0.0004 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00138} -1434961.4x^2 + 5271.9 \cdot x + 0.03 \, dx$$

$$U_t = 0.0038 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

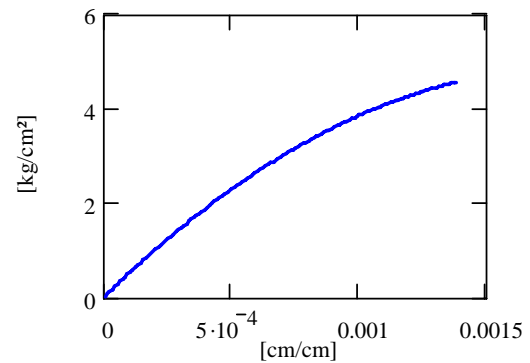


Figura C.23. Curva ajustada, murete 4

Murete 5b

Ecuación de la curva: $y = 5845917.7x^2 + 2068.5 \cdot x + 0.01$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.0002} 5845917.7x^2 + 2068.5 \cdot x + 0.01 \, dx$$

$$U_r = 0.00006 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00027} 5845917.7x^2 + 2068.5 \cdot x + 0.01 \, dx$$

$$U_t = 0.00012 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

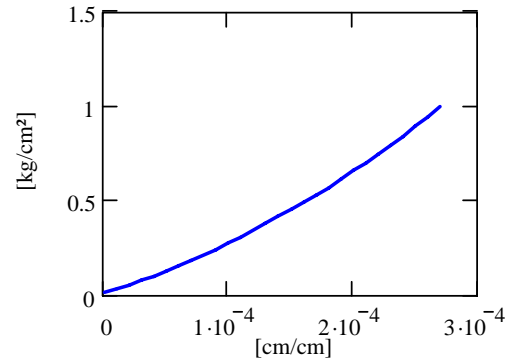


Figura C.24. Curva ajustada, murete 5b

Murete 6

Ecuación de la curva: $y = 275944564.3 \cdot x^3 - 1913143.2x^2 + 3564.6 \cdot x - 0.04$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00036} 275944564.3 \cdot x^3 - 1913143.2x^2 + 3564.6 \cdot x - 0.04 \, dx$$

$$U_r = 0.00019 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00168} 275944564.3 \cdot x^3 - 1913143.2x^2 + 3564.6 \cdot x - 0.04 \, dx$$

$$U_t = 0.00249 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

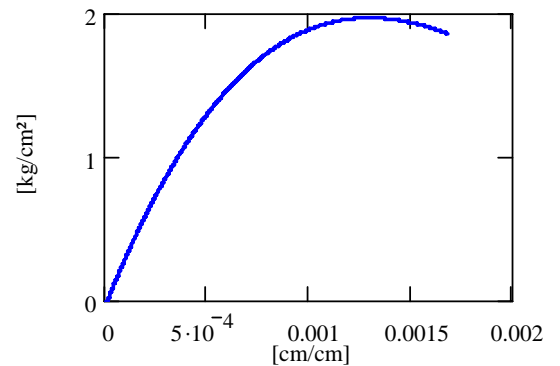


Figura C.25. Curva ajustada, murete 6

Murete 7

Ecuación de la curva: $y = -1507381.3x^2 + 2537.2 \cdot x + 0.02$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.0003} -1507381.3x^2 + 2537.2 \cdot x + 0.02 \, dx$$

$$U_r = 0.00011 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00087} -1507381.3x^2 + 2537.2 \cdot x + 0.02 \, dx$$

$$U_t = 0.00065 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

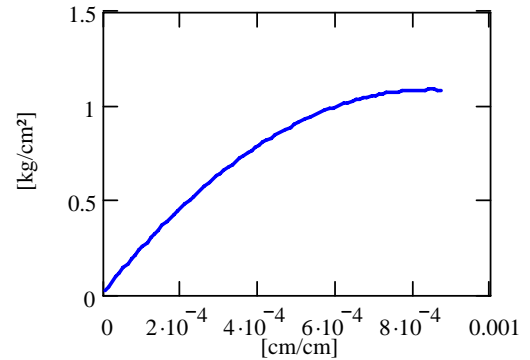


Figura C.26. Curva ajustada, murete 7

Murete 8

Ecuación de la curva: $y = -2624697.9x^2 + 5290.13 \cdot x + 0.06$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.0002} -2624697.9x^2 + 5290.13 \cdot x + 0.06 \, dx$$

$$U_r = 0.00011 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.001} -2624697.9x^2 + 5290.13 \cdot x + 0.06 \, dx$$

$$U_t = 0.00183 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

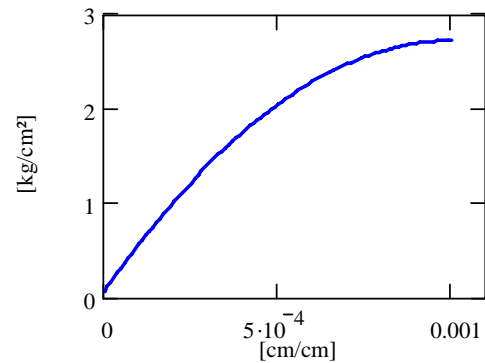


Figura C.27. Curva ajustada, murete 8

Murete 9

Ecuación de la curva: $y = 436089543.2 \cdot x^3 - 2515309.6x^2 + 4661.6 \cdot x + 0.04$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.0003} 436089543.2 \cdot x^3 - 2515309.6x^2 + 4661.6 \cdot x + 0.04 \, dx$$

$$U_r = 0.0002 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00167} 436089543.2 \cdot x^3 - 2515309.6x^2 + 4661.6 \cdot x + 0.04 \, dx$$

$$U_t = 0.00351 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

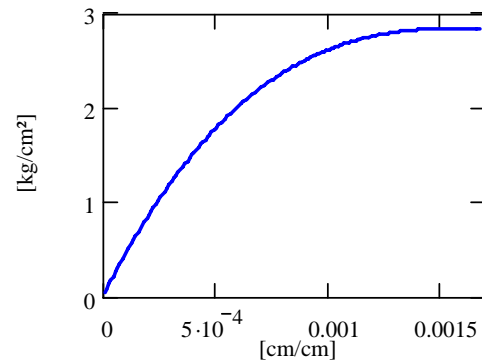


Figura C.28. Curva ajustada, murete 9

Resumen de resultados de muretes, arreglo 1

Tabla C.1. Resultados de energía de deformación de muretes correspondientes al arreglo 1

Muretes de mampostería combinada	Módulo de resiliencia U_r	Módulo de tenacidad U_t
Arreglo 1	kg-cm/cm^3	kg-cm/cm^3
Murete de prueba	0.00014	0.00144
Murete 1	0.00060	0.00363
Murete 2	0.00013	0.00113
Murete 3	0.00025	0.00318
Murete 4	0.00040	0.00380
Murete 5	0.00006	0.00012
Murete 6	0.00019	0.00249
Murete 7	0.00011	0.00065
Murete 8	0.00011	0.00183

$$\text{Módulo de resiliencia } (U_r) = 0.00022^1 \text{ kg-cm/cm}^3$$

$$\text{Módulo de tenacidad } (U_t) = 0.00218^1 \text{ kg-cm/cm}^3$$

¹Valores medios

A.4 Energía de deformación de muretes: arreglo 2

Murete 1

Ecuación de la curva: $y = 228537285.6 \cdot x^3 - 2148274.9x^2 + 5805.3 \cdot x - 0.05$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00060} 228537285.6 \cdot x^3 - 2148274.9x^2 + 5805.3 \cdot x - 0.05 \, dx$$

$$U_r = 0.00087 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00283} 228537285.6 \cdot x^3 - 2148274.9x^2 + 5805.3 \cdot x - 0.05 \, dx$$

$$U_t = 0.01054 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

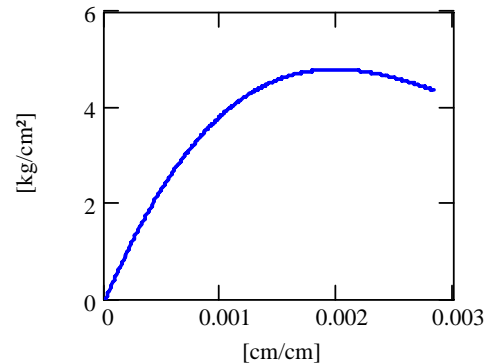


Figura C.29. Curva ajustada, murete 1

Murete 2

Ecuación de la curva: $y = 3984.7x + 0.1449$

intervalo elástico

$y = -662588 \cdot x^2 + 2515.1 \cdot x + 1.2185$

intervalo inelástico

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00058} 3984.7x + 0.1449 \, dx$$

$$U_r = 0.00075 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00058} 3984.7x + 0.1449 \, dx + \int_{0.00058}^{0.00299} -662588 \cdot x^2 + 2515.1 \cdot x + 1.2185 \, dx$$

$$U_t = 0.00865 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

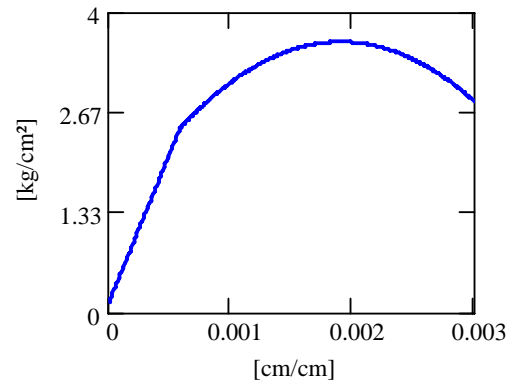


Figura C.30. Curva ajustada, murete 2

Murete 3

Ecuación de la curva: $y = 2695.2 \cdot x + 0.3337$

intervalo elástico

$$y = -21249x^2 + 344.88 \cdot x + 2.695$$

intervalo inelástico

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00100} 2695.2 \cdot x + 0.3337 \, dx$$

$$U_r = 0.00168 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00100} 2695.2 \cdot x + 0.3337 \, dx + \int_{0.00100}^{0.00952} -21249x^2 + 344.88 \cdot x + 2.695 \, dx$$

$$U_t = 0.03399 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

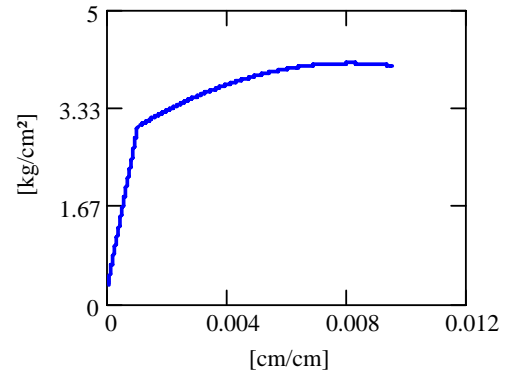


Figura C.31. Curva ajustada, murete 3

Murete 4

Ecuación de la curva: $y = 2851.4 \cdot x + 0.2257$

intervalo elástico

$$y = 5413.9 \cdot x^2 + 213.6 \cdot x + 1.659$$

intervalo inelástico

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00060} 2851.4 \cdot x + 0.2257 \, dx$$

$$U_r = 0.00065 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00060} 2851.4 \cdot x + 0.2257 \, dx + \int_{0.00060}^{0.01105} 5413.9 \cdot x^2 + 213.6 \cdot x + 1.659 \, dx$$

$$U_t = 0.03342 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

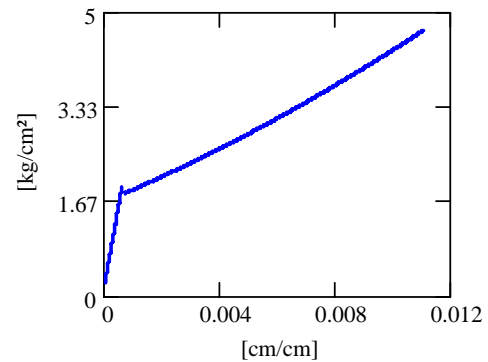


Figura C.32. Curva ajustada, murete 4

Murete 5

Ecuación de la curva: $y = 4305.6 \cdot x + 0.2456$

intervalo elástico

$$y = -102225 \cdot x^2 + 618.05 \cdot x + 3.1195$$

intervalo inelástico

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00072} 4305.6 \cdot x + 0.2456 \, dx$$

$$U_r = 0.00129 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00072} 4305.6 \cdot x + 0.2456 \, dx + \int_{0.00072}^{0.00596} -102225 \cdot x^2 + 618.05 \cdot x + 3.1195 \, dx$$

$$U_t = 0.02125 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

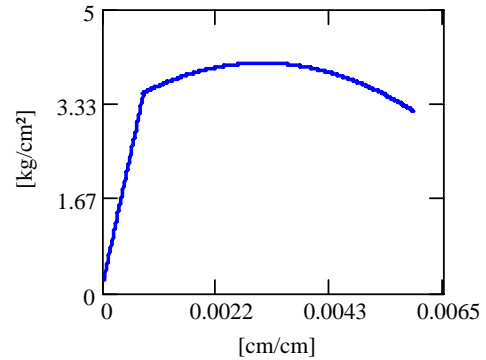


Figura C.33. Curva ajustada, murete 5

Murete 6

Ecuación de la curva: $y = 3709.2x + 0.1767$

intervalo elástico

$$y = -106543 \cdot x^2 + 817.23 \cdot x + 3.7782$$

intervalo inelástico

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00121} 3709.2x + 0.1767 \, dx$$

$$U_r = 0.00293 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00121} 3709.2x + 0.1767 \, dx + \int_{0.00121}^{0.01043} -106543 \cdot x^2 + 817.23 \cdot x + 3.7782 \, dx$$

$$U_t = 0.04138 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

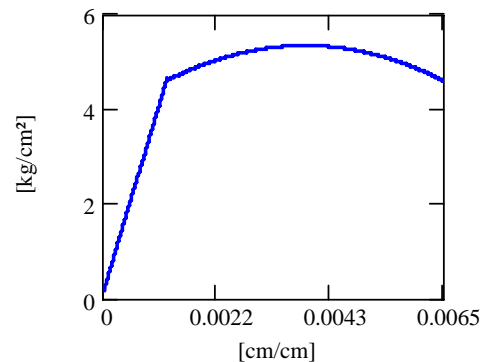


Figura C.34. Curva ajustada, murete 6

Murete 7Ecuación de la curva: $y = 2746.1x + 0.1532$

intervalo elástico

$$y = -101445 \cdot x^2 + 741.5 \cdot x + 1.4384$$

intervalo inelástico

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00060} 2746.1x + 0.1532 \, dx$$

$$U_r = 0.00059 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00060} 2746.1x + 0.1532 \, dx + \int_{0.00060}^{0.00549} -101445 \cdot x^2 + 741.5 \cdot x + 1.4384 \, dx$$

$$U_t = 0.01307 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Murete 8Ecuación de la curva: $y = -444641 \cdot x^2 + 3206 \cdot x + 0.268$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00052} -444641 \cdot x^2 + 3206 \cdot x + 0.268 \, dx$$

$$U_r = 0.00055 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00120} -444641 \cdot x^2 + 3206 \cdot x + 0.268 \, dx$$

$$U_t = 0.00237 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

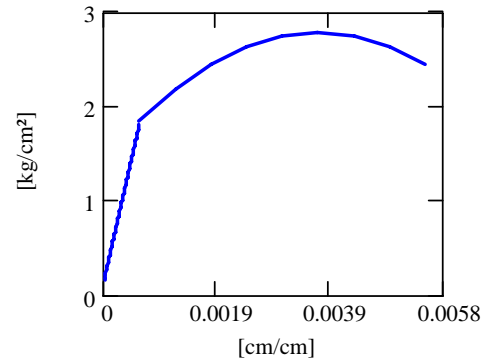


Figura C.35. Curva ajustada, murete 7

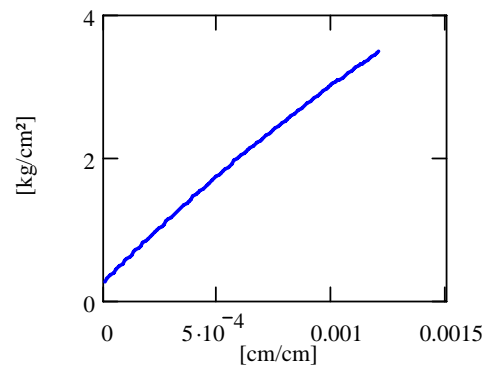


Figura C.36. Curva ajustada, murete 8

Murete 9Ecuación de la curva: $y = 4864.5x + 0.0795$

intervalo elástico

$$y = 351921524.8x^3 - 2579382.7 \cdot x^2 + 5559.02 \cdot x + 0.09 \quad \text{intervalo inelástico}$$

Calculando el módulo de resiliencia:

$$U_r := \int_0^{0.00033} 4864.5x + 0.0795 \, dx$$

$$U_r = 0.00029 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el módulo de tenacidad:

$$U_t := \int_0^{0.00033} 4864.5x + 0.0795 \, dx + \int_{0.00060}^{0.00376} 351921524.8x^3 - 2579382.7 \cdot x^2 + 5559.02 \cdot x + 0.09 \, dx$$

$$U_t = 0.01093 \quad \frac{\text{kg} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

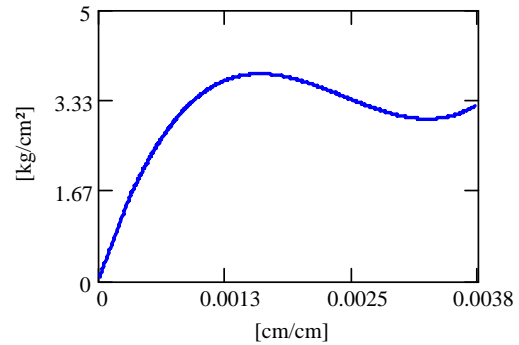


Figura C.37. Curva ajustada, murete 9

Resumen de resultados de muretes, arreglo 1

Tabla C.1. Resultados de energía de deformación de muretes correspondientes al arreglo 2

Muretes de mampostería combinada	Módulo de resiliencia U_r	Módulo de tenacidad U_t
Arreglo 2	kg-cm/cm^3	kg-cm/cm^3
Murete 1	0.00087	0.10540
Murete 2	0.00075	0.00865
Murete 3	0.00168	0.03399
Murete 4	0.00065	0.03342
Murete 5	0.00129	0.02125
Murete 6	0.00293	0.04138
Murete 7	0.00059	0.01307
Murete 8	0.00055	0.00237
Murete 9	0.00029	0.01093

$$\text{Módulo de resiliencia } (U_r) = 0.00107^1 \text{ kg-cm/cm}^3$$

$$\text{Módulo de tenacidad } (U_t) = 0.03005^1 \text{ kg-cm/cm}^3$$

¹Valores medios

REFERENCIAS

- Aguilar G, Cano G, Alcocer S M (1994), “Efecto del refuerzo horizontal en el comportamiento de muros de mampostería ante cargas laterales”, *Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructura*, Zacatecas Zac., México, octubre-noviembre, 1994, pp. 66-74.
- Alcocer, S M (1997), “Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión,” artículo de estado del arte, *XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Vol. I, Veracruz, México, noviembre, pp. 164-191
- Alcocer, S M, Murià-Vila D, y Peña I (1999), “Comportamiento dinámico de muros de mampostería confinada”, *Serie Azul No. 615*, Instituto de Ingeniería, UNAM, octubre.
- Ambrose, J (1991), “Simplified Design of masonry structures”, John Wiley and Sons, INC, New York, 1991
- Chopra, A K (1995), **Dynamics of Structures**, primera edición, Prentice Hall, pp. 91-103.
- Flores, L y Alcocer, S M. (2001), “Estudio analítico de estructuras de mampostería combinada”, Informe técnico, CENAPRED, 105b pp.
- Gobierno del Distrito Federal (2004) “Apéndice normativo A- Criterio de aceptación de sistemas constructivos a base de mampostería diseños por sismo”, México, pp 44-47.
- Gobierno del Distrito Federal (2004) “Normas Técnicas para Diseño por Sismo”, México, 44pp.
- Gobierno del Distrito Federal (2004) “Normas Técnicas para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería”, México, 21pp.
- Hibbeler, R C (1998), **Mecánica de materiales**, tercera edición, Prentice Hall, México, pp. 85-99
- Kwok, Y-H y Ang, A A-H (1987), “Seismic Damage Analysis and design of unreinforced masonry buildings”, *Structural Research Series No. 536*, University of Illinois at Urbana-Champaign, June 1987, pp 1-16.
- Meli, R (1971), “Propiedades mecánicas de la mampostería”, Serie No. 288, Instituto de Ingeniería, UAM, México D.F., Julio de 1971, 25 pp.

- Norma mexicana NMX-C-404-ONNCCE (1997), “Industria de la construcción-bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-especificaciones y métodos de prueba”, Norma Mexicana, 9 pp.
- NTCM-2004 (2004), “Normas técnicas para diseño y construcción de estructuras de mampostería”, Gaceta del gobierno del Distrito federal, 21 pp.
- NTCM-2004 (2004), “Apéndice normativo A- Criterio de aceptación de sistemas constructivos a base de mampostería, diseños por sismo”, Gaceta del gobierno del Distrito federal, 44 pp.
- ONNCCE (2006), “Determinación de la resistencia a compresión diagonal y rigidez a cortante de muretes y la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de barro o de concreto-Método de prueba”, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, México, 12 pp. (en consulta publica)
- Pineda, J A (1996) “Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada,” *Tesis de maestría*, UNAM, México, D.F, enero, 171 pp.
- Rosenblueth, E y Newmark, N M (1971), **Fundamentos de Ingeniería Sísmica**, Editorial Diana, México
- Ruiz J (1995) “Reparación y refuerzo de una estructura tridimensional de mampostería confinada de dos niveles a escala natural,” *Tesis de maestría*, UNAM, México, D.F, 251 pp.
- Tena, A (2003) “Apuntes de estructuras de mampostería”, UAM Azcapotzalco, México,
- Terán, A (2004-P) “Apuntes de Diseño Sismorresistente de Estructuras de Concreto”, UAM Azcapotzalco, México, pp 83-97.
- Saad, MA, (1979), **Tratado de construcción**, Tomo I, Compañía editorial continental, S.A., México, pp 89-160, 261-268.
- Salinas, V (2005), “Comportamiento de Muros de mampostería combinada y confinada ante cargas laterales”,*Proyecto terminal de licenciatura*, UAM, México, D.F., 54 pp.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. (2004). **Edificaciones de mampostería para vivienda**, libro electrónico co-editado por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Fundación ICA y la Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda, México, D.F., 316 pp.
- Tomazevic, M (1999), **Earthquake-resistamt design of masonry buildings**, Imperial College Press, 1999, London, pp

- Zepeda, J A, Pineda J A y Alcocer S M (1996) “Comportamiento ante cargas laterales de muros de mampostería confinada reforzados con malla electrosoldada,” *X Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Mérida, México, noviembre, pp. 919-925.
- Zepeda, J A, Pineda J A y Alcocer S M (2001), “Comportamiento ante cargas laterales de muros de ladrillo de arcilla perforado y multiperforado”, Informe técnico, CENAPRED, 222 pp.
- Zúñiga, O, (2005), “Evaluación analítica de la respuesta sísmica de las edificaciones de mampostería”, *Tesis de maestría*, UAM, México, D.F., pp. 32-37.